

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

KTM - 480

MĚŘENÍ DRSNOSTI A STRUKTURY
TEXTILIÍ METODOU PŘES HRANU

**System for roughness measurement and surface
characteristic of textiles with RCM system**

LIBEREC 2007

JAN KUZNĚCOV

Anotace

V úvodní části je popsáno co je to drsnost, její charakteristiky a způsoby měření na textilních materiálech. Experimentální část je zaměřena na bezkontaktní způsob pro hodnocení povrchové drsnosti textilií. Jsou uvedeny statistické parametry charakterizující nerovnosti a tvar povrchu.. Pomocí obrazové analýzy jsou vyhodnocovány základní strukturní prvky zkoumaných síťovaných textilií. Jsou popsány vzájemné vztahy mezi drsností a parametry síťované textilie.

Annotation

The first part defines surface roughness , its characteristics and the ways to measure it on textile materials. The core of thesis is description of the non-contact way to assess the surface roughness of textiles, the output data from the device and their subsequent processing, and the statistical parameters characterizing the unevenness and shape of the surface. By means of image analysis, the the basic structural elements of textile nettings are evaluated. The comparism of mutual relationships between surface roughness and the technical textile parameters is presented.

Obsah

Seznam použitých zkratek a symbolů.....	8
Úvod.....	9
1. Drsnost povrchu	10
1.1. SMYSLOVÉ POSUZOVÁNÍ DRSNOSTI.....	10
1.2 VÝZNAM DRSNOSTI.....	10
1.3 DRSNOST TEXTILNÍCH MATERIÁLŮ	11
1.4. KLASIFIKACE DRSNOSTI	12
2 Měření drsnosti.....	13
2.1 BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ DRSNOSTI	14
3 Použitá metoda měření.....	15
3.1 ZAŘÍZENÍ RCM SYSTÉMU	15
3.1.1 <i>Popis vybraných částí systému</i>	17
3.2 OBRAZOVÁ ANALÝZA	20
4. Zpracování drsnosti.....	22
4.1 VYJÁDŘENÍ DRSNOSTI A POVRCHOVÝCH CHARAKTERISTIK	22
4.2 FRAKTÁLNÍ CHARAKTERIZACE DRSNOSTI.....	27
4.3 VZTAH DRSNOST A CHLUPATOST	38
5. Experiment	39
5.1 CHARAKTERISTIKA VZORKŮ.....	39
5.2 POSTUP MĚŘENÍ NA RCM SYSTÉMU A OBRAZOVÉ ANALÝZE	43
5.3 ZPŮSOB ZPRACOVÁNÍ PROFILU	44
5.4 VÝSLEDKY A DISKUZE.....	45
5.4.1 <i>Výsledky měření</i>	45
5.4.2 <i>Diskuze</i>	48

6. Závěr	52
Seznam použité literatury	54
Seznam příloh	55

Seznam použitých zkratk a symbolů

CV	variační koeficient výšky profilu
dj	body popisující profil povrchu
D	fraktálový rozměr
l	základní délka měřeného povrchu
MAD	průměrná absolutní odchylka profilu
MP	průměrná výška profilů
MS	průměrná absolutní směrnice profilu
MV	průměrná výška prohlubní
PC	průměrná křivost profilu
Pi	výška vrcholu
PSC	průměrný čtverec směrnice profilu
R	střední aritmetická odchylka profilu
Ra	průměrná hodnota výšek povrchu
Rz	střední hodnota z absolutních výšek deseti nejvyšších výstupků a hloubek deseti nejnižších prohlubní profilu v rozsahu základní délky
SMD	směrodatná odchylka geometrické drsnosti
t	jemnost
T	tloušťka
TP	výška nerovnosti profilu z deseti bodů
Vi	výška prohlubní
y	odchylka profilu
$y_{p \max}$	střední výška nerovnosti profilu
$y_{v \max}$	střední hloubka nerovnosti profilu

Úvod

Drsnost je důležitá vlastnost nejen textilních materiálů. Umožňuje rozdělení materiálů do mnoha skupin, od hrubého materiálu využívaného zejména pro technické účely až po velmi jemné a hladké materiály určené pro luxusní oděvní výrobu.

Jako jedna ze základních charakteristik povrchu textilií je i drsnost objektem podrobnějšího zkoumání. Existuje několik metod pro zjišťování drsnosti textilních materiálů. Snahou je kvantifikovat drsnost číselně.

Jedna z metod je objektivní měření bezdotykovou metodou RCM systému (měření povrchového profilu). Jde o měření bezdotykově pomocí kamery výstupní hodnoty budou založeny na rekonstrukci povrchu a jednotlivých profilů.

Cílem této diplomové práce je snaha o porovnání metody RCM strukturálními parametry vybraných textilních materiálů. Je ověřena možnost využití RCM k měření drsnosti jemnějších textilních vzorků. Je provedeno porovnání možností vyjádření drsnosti z RCM.

1. Drsnost povrchu

Pod pojmem drsnost textilií se rozumí povrchová nestejnomyšnost textilií. Drsnost může být hodnocena na všech úrovních, od vláknenné předlohy až po finální textilii. Výsledná drsnost může představovat kombinaci přirozené variability materiálu s konstrukční drsností získanou daným postupem výroby a zpracování. Drsnost výrazně ovlivňuje nejen vlastnosti posuzované smyslovými orgány, ale také funkčnost a aplikovatelnost daného materiálu či výrobku. Určité textilie z různých důvodů mají nebo musí mít určitou drsnost. Je to vlastnost určená pro daný konkrétní účel, někdy je vyžadována, jindy naopak potlačována.

1.1. Smyslové posuzování drsnosti

Při smyslovém vnímání drsnosti je těžké stanovit co drsnost představuje. Můžeme o některém zkoumaném povrchu říci, že je pro nás hladký nebo drsný. Obecně lze konstatovat, že drsné je všechno. I to, co se zdá na první pohled hladké je ve skutečnosti drsné, záleží na měřítku. Například skleněná tabule je hladká. Pokud bychom se podívali na tutéž tabuli detailněji, zjistíme, že je překvapivě drsná v celé své ploše a pokud bychom na sebe položili dvě skleněné tabule, nebudou se díky vlastní drsnosti povrchu dotýkat na více než 4 % své plochy [3]. Z tohoto názorného příkladu je patrné, že samotné měření drsnosti je relativní záležitost a vždy musí být posuzován aspekt účelnosti a finálních požadavků na danou textilii.

1.2 Význam drsnosti

Drsnost hraje významnou roli jako určující parametr technických a oděvních textilií. Povrchová drsnost úzce souvisí s třecí silou a třením. Je to vlastnost, která má nepřehlédnutelný vliv na soudržnost a přilnavost s ostatními materiály. Od tvaru a členitosti povrchu se odvíjí řada dalších vlastností jako je omak, tření, adheze, odraz světla a absorpce.

Na drsnost textilií má velký vliv způsob jejich výroby a parametry použitého materiálu (jemnost, zákrut a nestejnomyšnost příze). U plošných textilií má na povrchovou drsnost vliv vazba tkanin, vlas na povrchu a konečné úpravy.

1.3 Drsnost textilních materiálů

Měření drsnosti povrchu textilních materiálů, ale i netextilních materiálů, vyžaduje mimo jiné i vývoj měřicí techniky a hodnotících metod. Vyplývá to z nároků výrobců i uživatelů na zvyšování životnosti a funkční spolehlivost, podmíněnou rozměrovou i tvarovou přesností a drsností povrchu. Charakteristika struktury povrchu textilních materiálů, včetně definice parametrů a jejich měření závisí na popisu struktury, Popis struktury povrchu zahrnuje drsnost, vlnitost, chlupatost, a základní profil. Z toho vyplývá, že profil drsnosti povrchu a jeho parametry jsou součástí charakteristiky struktury povrchu. Měření a hodnocení struktury povrchu představuje specifickou část metrologie.

Drsnost povrchu může být hodnocena z různých hledisek např. pro vysvětlení procesu opotřebení, tření apod.

Prostřednictvím počítače lze z povrchového profilu určit velký počet charakteristik a hledat korelace mezi těmito charakteristikami drsnosti a strukturálními parametry.

Pro matematicko-statistické vyhodnocení je třeba mít k dispozici velké plochy. U textilních materiálů neexistují normy pro popis struktury zahrnující drsnost, neboť textil je velmi variabilní a charakteristika povrchu závisí na mnoha parametrech. V tom se textilní materiály liší od stanovení drsnosti obráběných materiálů ve strojírenství.

Drsnost je vyjadřovaná jako prostorové uspořádání (morfologie, textura) povrchu. Drsnost má své místo jako činitel jakosti, a to ve všech stádiích vědeckého výzkumu. Řada funkčních vlastností je určována geometrickými parametry. Přesnost

geometrických parametrů je dána souhrnem jejich odchylek od ideální geometrie.[1]
Informace o nerovnostech a jejich odchylkách je možné získat z křivky profilu (dále profil), která vznikne jako průsečnice roviny řezu kolmé k měřené ploše. Obvykle je tato rovina vedena kolmo na hlavní směr měřené nerovnosti.

1.4. Klasifikace drsnosti

Profil nerovností je rozkládán na dvě části podle měřítka geometrické nepřesnosti.

Makrogeometrie – tvar a vlnitost textilie

Mikrogeometrie – drsnost povrchu [1]

Drsnost můžeme také rozdělit na:

Strukturní – kdy se povrch mění v souladu s konstrukcí textilie a obvykle lze nalézt periodické opakování lokálních extrémů na křivce resp. ploše charakterizující reliéf.

Náhodná – kdy se povrch mění náhodně a nelze ho popsat jednoduchými geometrickými prostředky.

Celkovou – spojení předchozích dvou

Mohou vzniknout také tzv. strukturální změny nepatrně ovlivňující drsnost. Patří sem fyzikální a chemické pochody ve stavbě materiálu, napětí v krystalické mřížce či korozní pochody.

2 Měření drsnosti

Získání informací o nerovnostech a jejich odchylkách je možné získat z profilu.

Jednoduchým způsobem, jak drsnost zkontrolovat, jsou tzv. etalony drsnosti. Jsou to vzorky o různé drsnosti, se kterými se porovnávají kontrolované povrchy vzorků. Sada etalonů obsahuje vzorky ploch od těch nejvíce drsných až po ty, které se jeví zcela hladké. Při běžné kontrole se vzorky srovnávají s etalony pouze zrakem a hmatem.

Pro měření povrchové drsnosti u textilních útvarů se standardně používá přístroje systému KES (Kawabata evaluation system). Jedná se o dotykové měření, jehož principem je získávání profilu povrchu s použitím dotykového čidla (kontaktoru). Kontaktor je tvořen ocelovým drátkem o průměru 0,5 mm a který se pohybuje rychlostí přibližně 0,1 cm. Posunem kontaktoru po měřené ploše je získáván profil povrchu SHV (surface height variation). Standardní délka měřeného povrchu je 2 cm. Pro charakterizaci reliéfu se používá střední absolutní odchylka výšky povrchu. Další, podobnou dotykovou metodou je měření pomocí přístroje TIRATEST. Principem je opět kontinuální snímání a zaznamenávání zatíženého povrchu textilie pomocí kovového bříty. Výstupem je křivka členitosti povrchu SFV (surface force trace).[8]

Anizotropie drsnosti textilií

Je to jev při němž mechanické vlastnosti některých textilií závisejí na směru, ve kterém jsou měřeny. Anizotropii ovlivňuje například vazba tkanin nebo pletenin. Vazné body ve strukturách mohou ovlivnit výslednou velikost drsnosti. Proměříme-li například keprovou vazbu dotykovou metodou v různých směrech, získáme při měření na úhlu přibližně 150 stupňů větší odpor hrotu, hrot přejíždí tento proměřovaný pruh téměř kolmo než u 60 stupňů.

2.1 Bezkontaktní měření drsnosti

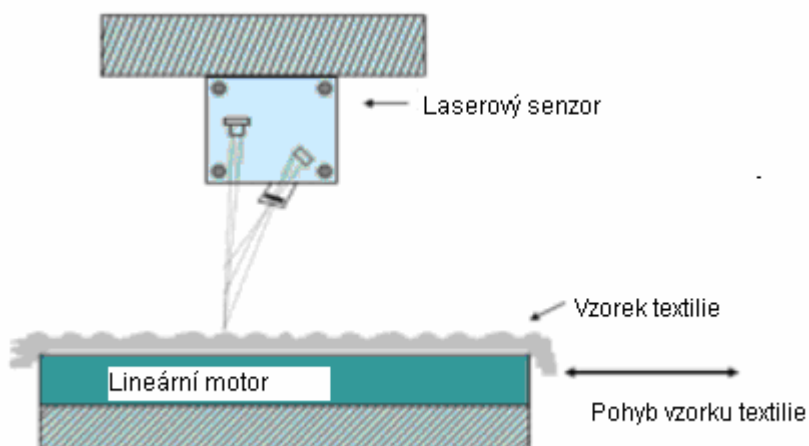
S výhodou lze získat profil povrchu také pomocí bezkontaktního měření.

Optické měřicí metody, umožňují kvantitativní měření drsnosti povrchu na principu analýzy obrazu povrchu. Výhodou optických metod je, že jsou bezdotykové a nepoškozuji kontrolovaný povrch, u některých je možné měřit větší část povrchu. Výsledkem měření jsou zvětšené obrazy profilů nebo celé profily.

Metody světelného řezu jsou založeny na principu promítání světelné roviny pod určitým úhlem na kontrolovanou plochu. Rozdíl je v konstrukci, a to že porovnávací i osvětlovací mikroskop je tvořen pouze jedním objektivem.[1]

Zařízení pro měření drsnosti povrchu metodou holografické interference umožňuje měřit drsnost v rozsahu desítek nanometrů až desítek mikrometrů. Lze určit prakticky všechny charakteristiky povrchu. Toto zařízení je laserový interferenční holografický mikroskop s laserovým světelným zdrojem o laditelné vlnové délce. Výstupem mikroskopu je obrazový hologram měřeného povrchu, který je přes mikroobjektiv snímán kamerou.

Na obr. 1 je ukázán princip bezkontaktního měřicího systému drsnosti, který je založen na laserovém posuvném snímači s vysokou přesností lineárního motorku řízeného magnetickou silou.



Obr. 1 Základní schéma laserového měřicího systému

Laserový posuvný snímač měří vlastní vzdálenosti a sám používá laserové vyměřovací techniky. Světelný paprsek s průměrem 0,3 mm je projektovaný z laserové diody do objektu. Senzor je schopen měřit vzdálenosti s rozlišením 1 μm. Vzorek textilie je umístěn a fixován na konstrukci, která je namontovaná na lineárním motoru. Celý systém je propojený s mikroprocesorem. Snímač změří drsnost povrchu na 2 cm délky podél osy a útku, protože tkaniny jsou anizotropní. Vzorek se pohybuje 1 mm za sekundu a ukládá 200 údajů za sekundu.[12]

Dalším způsobem měření drsnosti plochy textilií je pomocí systému snímání několika kamer z různých pohledů. Systém vybavený digitální kamerou, optickou soustavou a pohybovou platformou pro pozorování umožňuje stanovení povrchových vlastností textilních materiálů, jako je drsnost, reliéf, chlupatost a další parametry.

Účinky povrchové barvy textilií

Při měření s použitím laserového posuvného snímače nebo jiné metody používající optickou soustavu může nastat chyba podle stavu povrchu. Zvláště tkaniny jsou tkány a pleteny z různě barevných nití. Proto je nezbytné analyzovat účinky barev. V případě tmavých barev je chyba redukována a naopak jasné barvy mají zvýšené chyby.

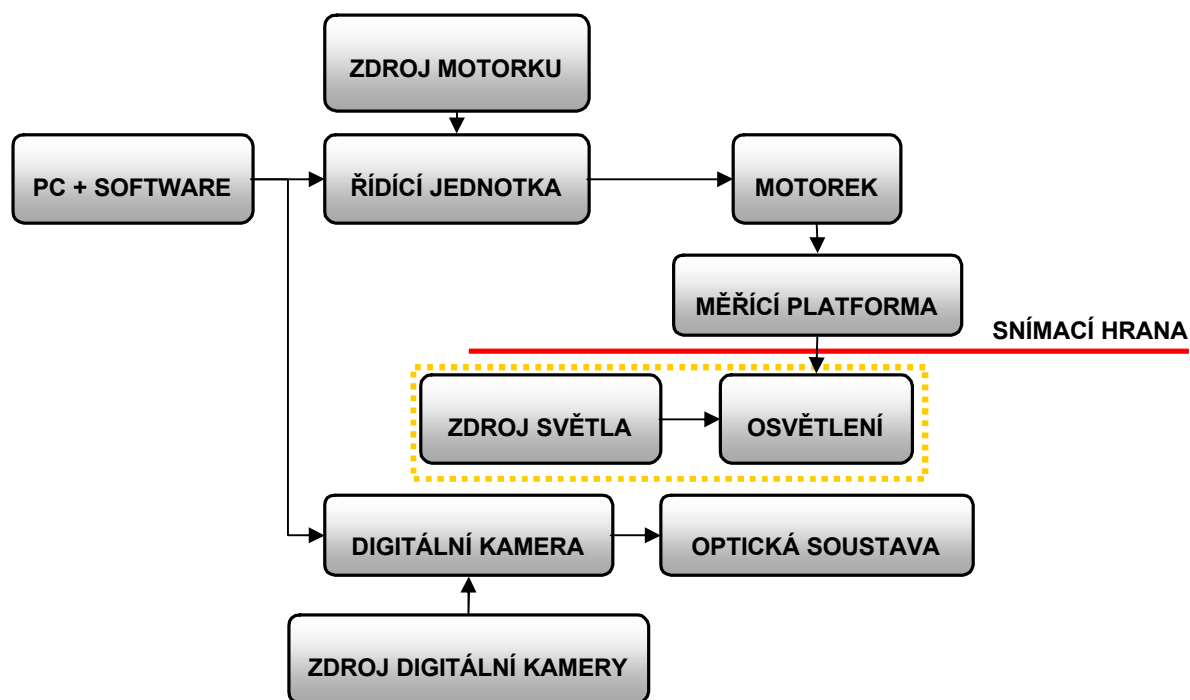
3 Použitá metoda měření

3.1 Zařízení RCM systému

RCM představuje bezkontaktní systém pro měření povrchových charakteristik textilních útvarů. Systém je založen na propojení a synchronizaci několika přístrojů, které jsou centrálně napojené a ovládané jedním řídicím počítačem. Přínosem systému je jeho velká variabilita a možnost přizpůsobit měření jednotlivým cílovým

požadavkům a typům materiálů. Další nespornou výhodou je jeho vysoká efektivnost. Na jednom systému lze změřit a popsat všechny dostupné povrchové parametry, provést jejich vyhodnocení a zároveň vytvořit doprovodnou obrazovou dokumentaci.

Samotné měření probíhá tak, že zkoumaný materiál je pomocí rolovacího zařízení, umístěného na měřicí platformě a poháněného krokovým motorkem, převíjen přes ostrou hranu, kde dochází ke zvýraznění typických rysů a parametrů textilie. Materiál je na této hraně snímán pomocí optické soustavy s digitální kamerou propojenou s řídicím počítačem. Výsledkem je profil povrchu. Osvětlení hrany je zajištěno horním osvitem umístěným nad měřicí hranou. Osvětlení je napájeno z regulovatelného zdroje. Posuv měřeného vzorku pomocí krokového motorku je řízen z počítače. Motorek je napájen zdrojem a signál s povely motorku vysílané počítačem jsou předávány přes řídicí jednotku, která předává motorku potřebné elektrické napájení a pohybové signály. Řídicím počítačem lze ovládat pohyb motorku a snímací parametry kamery. Výsledný obraz je přenášen a prezentován v programu pro zpracování, který umožňuje jeho zpracování, vyhodnocení a uložení. Výsledkem je pak rekonstrukce celé povrchové plochy. Jednoduché schéma RCM systému s reálnou provázaností je na obr. 2.



Obr. 2 Schéma RCM systému

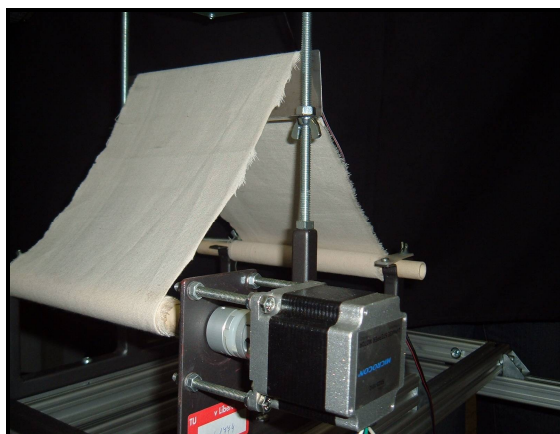
Efektivnost a variabilita systému spočívá zejména v jeho centrální ovladatelnosti. Pomocí programových příkazů lze definovat pohyb zkoumané tkaniny přes hranu, tento pohyb snímat a zaznamenávat, následně vyhodnocovat a zpracovávat. Nedochozí tedy k žádným časovým prodlevám mezi jednotlivými úkony, které lze centrálně přesně definovat na základě vypracovaných metodik měření. [3]

3.1.1 Popis vybraných částí systému

Celý systém se skládá z několika přístrojů a částí, jejichž vhodným propojením a kombinací lze systém uzpůsobit pro jednotlivá měření.

Motorek

Hybridní dvoufázový krokový motorek řady SX23 – 1012 od společnosti Microcon. Motorek se vyznačuje vysokým momentem a malými rozměry. Jeho úkolem je pohybovat rolovacím zařízením v předem nadefinovaných krocích, jejichž velikost, rychlost a počet lze přes řídicí jednotku přesně definovat z počítače.



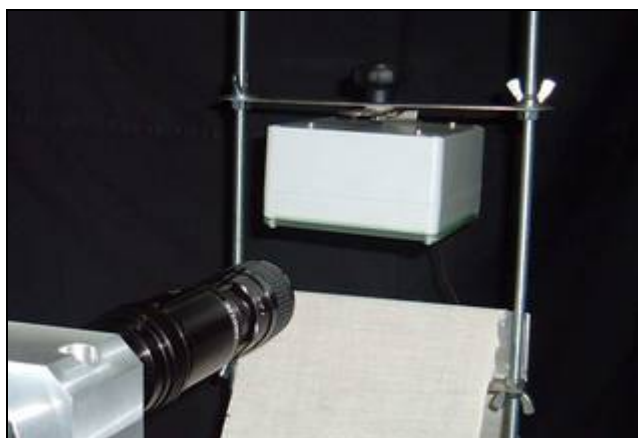
Obr. 3 Krokový motorek s rolovacím zařízením

Řídící jednotka

Řídící jednotka je prostředník mezi počítačem a krokovým motorkem. Také slouží k regulaci napětí, dodávaného od zdroje a transformovaného k motorku. Řídící jednotka M 1486 integruje v jednom obvodu plně programovatelné řízení krokového motoru i univerzální řídicí funkce (vstupy/výstupy) a umožňuje tak realizovat kompletní řízení rolovacího zařízení. Řídící jednotka umožňuje dělení kroku, tzv. mikrokrokování, které výrazně omezuje oscilaci jednotlivých kroků a rezonance při nízkých rychlostech posuvů. Počet mikrokroků na jeden celý krok lze naprogramovat na hodnoty 1 – 64, čímž lze docílit velice jemného a přesného posuvu materiálu přes hranu.

Osvětlení

Důležitou roli v celém systému představuje osvětlení. Má přímý vliv nejen na zobrazovací parametry, ale také na kvalitu snímaného obrazu. Kvalitním osvětlením lze docílit zvýraznění detailů, vyostření struktury a lepší rozlišovací schopnosti. Homogenita osvětlení je zajištěna osvětlením s diodovým polem, které je konstruováno tak, aby světlo dopadalo pouze na snímací hranu. Při sestavování osvětlení se vycházelo z požadavku přiměřeného osvitu, aby nedocházelo k přesvícení hrany a tím i ke ztrátě údajů o charakteru povrchu. Toho je dosaženo použitím supersvítivých diod, které zajišťují dostatečné osvětlení a přitom nezpůsobují odlesk na snímací hraně (obr.4).



Obr. 4 Osvětlení nad snímací hranou

Pro dosažení maximální homogenizace intenzity výstupního světla je kryt osvětlovače tvořen jemně pískovým sklem. Celý osvětlovač je tvořen diodovým polem o 63 diodách, které jsou seřazené v 7 řadách po 9 diodách. Supersvítivé diody mají barevnou spektrální čáru o 550 nm, zvolenou podle největší spektrální citlivosti snímací digitální kamery. Tím je dosaženo maximální využití osvětlení i při nižších intenzitách. Není tedy potřeba na snímací hranu svítit s větší intenzitou a tím ji přesvécovat, což přináší ztrátu na kvalitě a reálnosti obrazu. Některé předměty či strukturní charakteristiky mohou být přesvícením zkresleny.

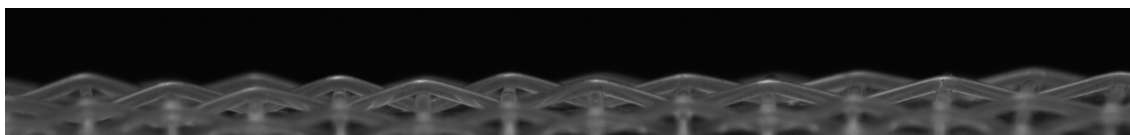
Digitální kamera

Pro zaznamenávání obrazu snímací hrany je použita digitální černobílá kamera VossKuhler, typ CCD-1300FQ. Jde o speciální rychlou kameru, která je určena pro snímání pohybujících se objektů, vhodná pro pohybující se strukturu na snímací hraně. Kamera zaznamenává obraz a přenáší jej do programu NIS elements na řídicím počítači. Zde je obraz v jednotlivých mikrosekvencích zaznamenáván pro další obrazové zpracování. Rychlost kamery 25 snímků/sec. při maximálním rozlišení (1280 x 1024 pixelů) poskytuje možnost zaznamenávat pohyb na hraně po nepatrně malých posuvech a ukládat je poté v obrazových souborech pro další zpracování a vyhodnocování. Hodnota rozlišení zaručuje vysokou kvalitu získaného obrazu. Senzor 2/3 s velikostí pixelu 6,45 μm poskytuje možnost použít všechny druhy optických zařízení.

Optická soustava

Optická soustava NAVITAR 12X Zoom Vision System je přímo napojena na digitální kameru a umožňuje přiblížení a zaostření obrazu do požadované úrovně. Optický systém disponuje 12x zvětšením které umožňuje dostatečné zvětšení pozorované textilie až na parametry přímo měřitelné a rozeznatelné. Je vybaven záložkou zoomu, která přesně stanovuje danou míru zvětšení a přispívá k lepší definovatelnosti měření.

Při nastavení přístroje na požadované parametry získáme nasvícenou hranu vzorku zobrazenou v programu obrazové analýzy viz obr.5.



Obr. 5 Pracovní plocha NIS elements s nasvícenou hranou vzorku

3.2 Obrazová analýza

Obrazová analýza je systém skládající se ze tří částí: z optického mikroskopu, kamery a osobního počítače s obrazovou analýzou. V laboratoři byl použit systém NIS vyvinutý firmou Nikon. Je to programový systém používaný pro pořizování a ukládání obrazů, interaktivní měření geometrických vlastností vláken, přízí a plošných textilií nebo jiných netextilních materiálů. Systém umožňuje archivování rozsáhlých obrazových sekvencí a jejich zpracování. Obrazová analýza používá transformaci obrazu, identifikaci zkoumaného objektu – segmentaci a kvalifikaci do omezeného množství hodnot nebo měření. Cílem je získat reprezentativní a dále použitelné hodnoty, které jsou pro zkoumanou strukturu typické a mají přínos pro vývoj určitého oboru.

Popis funkce obrazové analýzy můžeme stručně charakterizovat:

1. Snímání obrazu – rozumíme transformaci z optické veličiny na elektronickou veličinu. Aby bylo možné obraz zpracovat v počítači, je potřeba obraz nasnímat a digitalizovat. Digitalizování obrazu je převedení analogové veličiny do formy digitálních dat. Snímání obrazu lze provést dvěma způsoby: TV kamera, automatický snímač nebo digitální tabletem – ruční vstup.
2. Transformací je možné zlepšit obraz pro další zpracování. Transformaci lze definovat jako předzpracování obrazu.
3. Segmentace nebo-li dekodování, slouží k podání kvalitní výpovědi pro obrazovou strukturu. Je důležitým krokem v obrazové analýze, protože touto

operací rozdělíme obraz na pozadí a zkoumaný objekt. Segmentace je převod původního obrazu na binární.

4. Pro měření obrazové analýzy existují dva základní principy. Funkční princip – obraz chápeme jako určitou funkci. A morfologický princip – obraz chápeme jako bodovou množinu. Funkční princip je výhodnější pro tzv. denziometrii a morfologický princip pro tzv. morfometrii. Morfologický princip se zabývá kvantifikací obrazové struktury a podává výpověď o geometrických hodnotách jako je plocha, obvod, atd.

Obraz je chápán jako fyziologický zrakový vjem. NIS zpracovává a analyzuje barevný a černobílý obraz. Zpracování binárního obrazu je spojené s matematickou morfologií. Principem tohoto matematického odvětví a jeho aplikace v programu Lucie G, je vnímání analyzovaného objektu jako bodové množiny. Program používá obrazových bodů (pixelů tj. picture element) na vytvoření obrazu. Program NIS pracuje se třemi základními typy obrazů: binární obraz, barevný obraz a šedý obraz.

Náročnost konfigurace PC je z důvodu živého snímání obrazu, které je paměťově velice náročné. Kvalitní vyobrazení zajišťuje LCD monitor s vysokým rozlišením (musí mít parametry kamery, při menším dochází ke snížení kvality a nedostatečnému využití rozlišení kamery). Pro zpracování signálu obrazu z kamery je použit obrazový analyzátor NIS, který umožňuje nastavením vstupů snadnou ovladatelnost kamery a poskytuje komfortní zpracování a vyhodnocování obrazu.

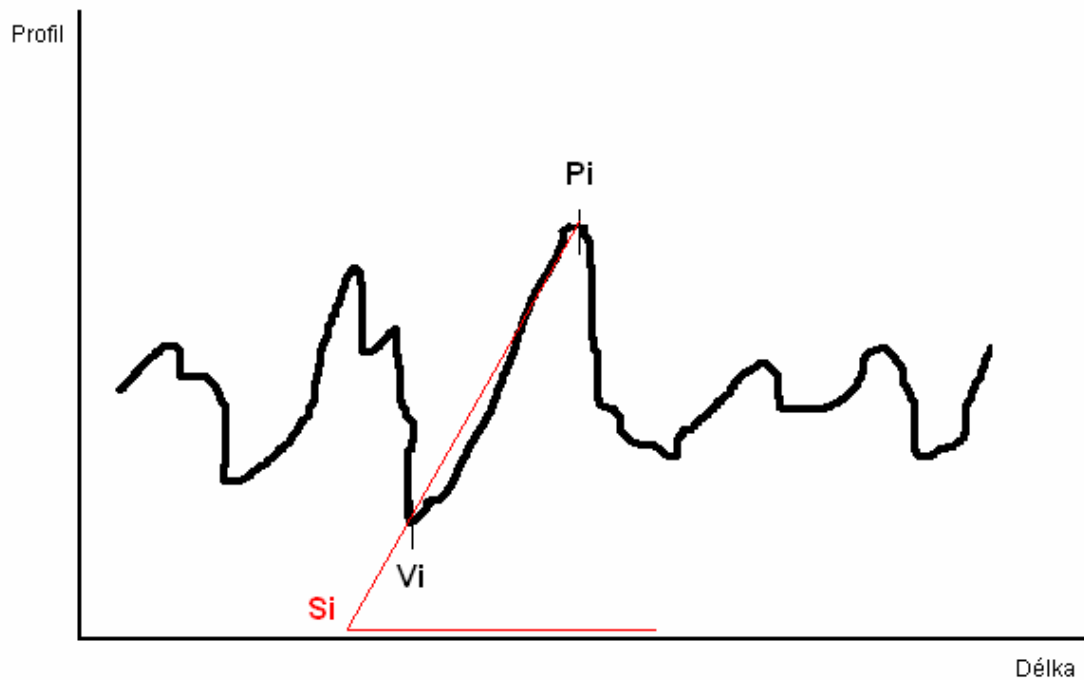
Na vzorcích síťovaných textilií bylo provedeno měření drsnosti v ploše s využitím níže popsaných metod obrazové analýzy a RMC systému.

4. Zpracování drsnosti

4.1 Vyjádření drsnosti a povrchových charakteristik

Povrchové charakteristiky

Si – směrnice vyjadřuje úhel sklonu mezi vrcholy a prohlubněmi viz obr.6



Obr. 6 Si směrnice profilu

MAD – průměrná absolutní odchylka.

$$MAD = \frac{1}{M} \sum_j |R_j - R_a| \quad (1)$$

Parametr se rovná průměru absolutní odchylky povrchových výšek od průměrné hodnoty. Avšak není dostačující pro charakteristiku profilů různých tvarů. Využívá se často pro kontrolu kvality.

SD – směrodatná odchylka (má z vypovídací vlastnosti pro případ, že data jsou nezávislá a mají stejné normální rozdělení). R_a = průměrná hodnota absolutních výšek

$$SD = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_j (R_j - R_a)^2} \quad (2)$$

MP – průměrná výška vrcholů je vypočítána jako průměrná odchylka profilu nad referenční hodnotou R. Je dána jako průměrná hodnota vrcholů.

MV – průměrná hloubka prohlubní je počítána jako průměrná odchylka profilu pod referenční hodnotou R. Je dána jako průměrná hodnota prohlubní.

Parametry MP a MV poskytují informace o komplexitě profilu povrchu.

PSC - průměrný čtverec směrnice povrchu je dán vztahem

$$PSC = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_j \left(\frac{dR(x)}{dx} \right)_j^2} \quad (3)$$

PC – průměrná křivost profilu, je často označována jako vlnitost a je definována vztahem

$$PSC = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_j \left(\frac{d^2 R(x)}{dx^2} \right)_j^2} \quad (4)$$

PC a PSC jsou parametry charakterizující tvar profilu. Například nižší parametr směrnice v praxi znamená menší tření.

MS – průměrná absolutní směrnice profilu je dána vztahem

$$MS = \frac{1}{M} \sum_j \left| \frac{dR(x)}{dx} \right|_j \quad (5)$$

TP – výška nerovnosti profilu z deseti bodů, kde Rz je definována jako střední hodnota z absolutních výšek deseti nejvyšších výstupků profilu a hloubek deseti nejnižších prohlubní profilu v rozsahu základní délky

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^{10} |y_{pmi}| + |y_{vmi}|}{10} \quad (6)$$

Tento parametr je citlivý na přítomnost vysokých hodnot vrcholů a nízkých hodnot prohlubní.

Pro stanovení dalších vlastností se používají statistické charakteristiky jako špičatost a šikmost a charakteristiky prostorové závislosti jako jsou autokorelace a variogram.

Fourierova analýza

Fourierova transformace je vyjádření časově závislého signálu pomocí harmonických signálů, tj. funkcí sin a cos, obecně tedy funkce komplexní exponenciály. Slouží pro převod signálů z časové oblasti do oblasti frekvenční. Obecná topografie povrchu je rozdělena do oblastí souvisejících s vlnovou délkou nebo frekvencí. Drsnost je potom kolísání v rozsahu krátkých vlnových délek (vysoká frekvence). Signál může být buď ve spojitém či diskrétním čase. Pomocí této řady lze rozložit i značně komplikované funkce, které by jinak byl problém zobrazit.

Fourierova transformace $S(\omega)$ funkce $s(t)$ je definována integrálním vztahem

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-i\omega t} dt \quad (7)$$

Funkci $s(t)$ vypočteme z $S(\omega)$ inverzní Fourierovou transformací

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega)e^{i\omega t} d\omega \quad (8)$$

Dvojice ve Fourierově transformaci se nazývají originál (zde $s(t)$) a obraz (zde $S(\omega)$). Vztah mezi originálem a obrazem vyjadřujeme zápisem

$$S(\omega) = F[s(t)] \quad (9)$$

nebo

$$s(t) = F^{-1}[S(\omega)] \quad (10)$$

V technické oblasti je ω úhlový kmitočet. Pak $S(\omega)$ představuje spektrum signálu $s(t)$. Označení spektra volíme obvykle stejné jako označení signálu, ale velkým písmenem.

Spektrum je komplexní veličina. Velikost $S(\omega)$ nazýváme amplitudové spektrum a úhel $\arg S(\omega)$ fázové spektrum signálu.

Posun signálu v čase

Má-li signál $s(t)$ spektrum $S(\omega)$, má signál posunutý o veličinu a spektrum

$$F[s(t - a)] = e^{-j\omega a} S(\omega) \quad (11)$$

Amplitudové spektrum posunutého signálu se nemění, mění se jen fázové spektrum a to úměrně zpoždění a kmitočtu.

Diskrétní Fourierova transformace

Definiční vztahy Fourierovy transformace vyžadují znalost matematického vyjádření signálu či spektra. Pokud však zpracováváme naměřené hodnoty, tj. známe vzorky signálu či spektra z konečného intervalu, stojíme před problémem, jak určit spektrum ze vzorků signálu či signál ze vzorků spektra. K tomu účelu používáme numerické metody, jako je diskrétní Fourierova transformace (DFT).

Diskrétní Fourierova transformace našla velké uplatnění zejména s rozvojem výpočetní techniky. Součástí řady přístrojů jsou jednoúčelové procesory realizující tuto transformaci. Její hlavní rozvoj nastal po roce 1965, kdy J.W. Cooley a J.W. Tukey popsali velmi efektivní algoritmus výpočtu DFT, tzv. rychlou Fourierovu transformaci (FFT - Fast Fourier Transform). Díky tomuto algoritmu se stala diskrétní Fourierova transformace nejrozšířenějším prostředkem pro numerický výpočet Fourierovy transformace. [] Algoritmus FFT je také implementován ve všech dobrých matematických programech jako je např. Matlab.

Diskrétní Fourierova transformace:

$$D(n) = \sum_{k=0}^{N-1} d(k) e^{-\omega k 2\pi / N}, n = 0, \dots, N-1 \quad (12)$$

Přímá diskrétní Fourierova transformace

Výpočet DFT podle definičního vztahu vyžaduje N^2 komplexních součinů a N^2 komplexních součtů. Toto množství operací výrazně snižuje možnost aplikace DFT na výpočty v reálném čase. Existuje však efektivní algoritmus výpočtu DFT, nazývaný rychlá Fourierova transformace (FFT - Fast Fourier Transform), který vyžaduje jen $N / 2 \log_2(N)$ komplexních součinů a $N \log_2(N)$ komplexních součtů.

Variogram

Variogram je zobrazení jak rychle se daná vlastnost mění od průměru. Principem je, že dvě hodnoty, které jsou si blíže, jsou si také více podobné než hodnoty vzdálenější. Hodnoty se mohou měnit v jednom směru rychleji než v druhém. Variogram je proto funkcí závislou na směru.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} [V(x_i) - V(x_i + h)]^2 \quad (13)$$

Kde $\gamma(h)$ je semivariogram pro posun h , n je počet párů ve vzdálenostech h , $V(x_i)$ a $V(x_i+h)$ jsou vzorové hodnoty v místě x_i a $x_i + h$.

Variogram může být použit pro odhad fraktální dimenze povrchů.

4.2 Fraktální charakterizace drsnosti

Co je fraktál

Téměř všechny objekty vyrobené člověkem jsou geometricky jednoduché a mohou být popsány jako obvyklé geometrické tvary jako jsou čáry, roviny, kruhy atd. Některé objekty však nejsou úplně podobné obvyklým geometrickým tvarům. Jedna z kategorií těchto objektů se nazývá fraktály. Fraktály jsou geometrické objekty, které lze nejjednodušeji definovat jako nekonečně členitý útvar. Pro vysvětlení tohoto pojmu musíme definovat pojem geometricky hladký útvar, který je jistým způsobem pravým opakem nekonečně členitého útvaru.

Geometricky hladké útvary

Běžná tělesa a útvary v našem okolí se dají popsat nebo zobrazit jako jistý konečný počet parametrů, které tato tělesa charakterizují. Pro základní geometrické tvary, například pro krychli, kouli, válec, prstenec, úsečku, přímku či rovinu, známe vzorce a vztahy, ze kterých můžeme vypočítat jejich geometrické charakteristiky, například délku, plochu či objem. Jako samozřejmost přitom bereme to, že výsledek je vždy stejný, i když počítáme v libovolných jednotkách. Je například nepodstatné, zda je poloměr koule zadaný v milimetrech či kilometrech; objem koule či její povrch vyjde vždy stejný (samozřejmě při přepočtu na stejné jednotky).

Tyto veličiny (objem, povrch atd.) můžeme spočítat i pro poněkud složitější útvary, které vzniknou kombinací konečného počtu elementárních útvarů. Všechny tyto útvary mají jednu společnou vlastnost. Každému útvaru můžeme přiřadit jisté celé číslo, které nazýváme počet rozměrů nebo také dimenze daného útvaru.

Takže úsečka, přímka či jiná křivka (například parabola, sinusovka či Bézierova křivka) má dimenzi rovnu 1. To znamená, že je jednorozměrná a tudíž poloha bodu je na ní definována pouze jedním číslem - souřadnicí. Například polohu bodu na sinusovce lze vyjádřit jako:

$$x = \sin(t) \tag{14}$$

kde t je jediný parametr, který jednoznačně definuje polohu bodu na sinusovce. Hodnota x potom přímo udává polohu tohoto bodu.

To, že má křivka dimenzi rovnu jedné neznamena, že je zobrazována v jednorozměrném prostoru. Dimenze udává jen počet parametrů, které jsou nutné pro definování bodu na křivce. Následující křivka má dimenzi rovnu jedné, ale je zobrazována v trojrozměrném prostoru:

$$\begin{aligned}x &= \sin(t^2) * \log(t) \\y &= \sqrt{\cos^2(t)} \\z &= \sin(\sqrt{t}) / \cos(t)\end{aligned}\tag{15}$$

Jediným použitým parametrem je zde opět t , polohu bodu potom definují tři souřadnice x, y a z .

Také můžeme uvažovat tak, že pro křivky, které mají dimenzi jedna, je definována jejich délka (která může být i nekonečná), ale jejich plocha je nulová (jsou nekonečně tenké).

Jakákoliv hladká plocha (kruh, trojúhelník, n -úhelník) má dimenzi rovnu 2, to znamená, že poloha bodu musí být definována pomocí dvou souřadnic. Například sedlová plocha je definována takto:

$$\begin{aligned}x &= u \\y &= v \\z &= u * v\end{aligned}\tag{16}$$

kde u a v jsou parametry, které jednoznačně definují jakýkoliv bod na ploše, zatímco x, y a z jsou výsledné souřadnice bodu v prostoru pro dané u a v . [2]

Takto definované plochy mají určitý obsah, ale jejich objem je nulový, protože mají nulovou tloušťku. Krychle, koule, válec nebo celý běžný prostor kolem nás mají dimenzi 3, protože poloha bodu je v nich jednoznačně určena třemi souřadnicemi. Ve všech předchozích případech jsme mluvili o dimenzi, která je specifikována celým číslem. Tato dimenze se nazývá dimenze topologická.

Pro tato tělesa, která můžeme označit jako normální nebo běžná, platí, že všechny jejich parametry mohou být zadány v libovolné jednotce, aniž by se změnila vlastnosti tělesa. To znamená, že nezáleží na měřítku, se kterým se na těleso díváme.

Nekonečně členité útvary

Z předchozí části vyplývá závěr, že pro běžné útvary vystačíme s dimenzemi 0, 1, 2 nebo 3. Proto bylo poměrně velkým překvapením, když byly objeveny zvláštní geometrické útvary, pro které toto rozdělení na celočíselné dimenze není dostatečné. Některé tyto útvary nejsou jen abstraktní objekty vzniklé fantazií matematiků, ale mají své vzory přímo v přírodě.

Klasický příklad takového útvaru je břeh nějaké řeky či potoka, nebo pobřeží nějakého reálného ostrova. Můžeme zkusit vypočítat délku pobřeží tohoto ostrova. Je-li linie pobřeží zobrazena na mapě (nebo leteckém snímku), má tato mapa určité měřítko, například 1: 1 000 000. Pomocí měřítka můžeme (krokováním) délku pobřeží přibližně zjistit a přepočítat na kilometry, protože známe měřítko mapy. Jestliže bude kružítko roztaženo tak, aby vzdálenost mezi jeho hroty byla jeden centimetr a měřítko mapy je 1 : 1 000 000, pak to znamená, že při jednom kroku kružítka se na mapě posuneme o 1 000 000 centimetrů, což po přepočtu dává deset kilometrů.

Dostaneme-li však k dispozici přesnější mapu, která má lepší měřítko například 1: 10 000 a budeme-li opět měřit délku toho samého úseku pobřeží, dostaneme délku odlišnou - větší. To znamená, že se změnou měřítka se změnila délka toho samého objektu - v našem případě pobřeží. Důvod se zdá být jasný, při zmenšení měřítka vidíme i detaily pobřeží, které nebyly na mapě s větším měřítkem viditelné. Samozřejmě, že při cestě pěšky okolo ostrova bude délka ještě větší, ovšem za předpokladu, že půjdeme přesně na hranici pobřeží a nebudeme si cestu zkracovat. Se zmenšujícím se měřítkem by délka dále rostla, a při délce měření blízké se limitně k nule, by délka rostla dokonce až do nekonečna. Z toho vyplývá zajímavý fakt, že ostrov o konečné ploše má nekonečnou délku pobřeží.

Předpokládejme, že je k dispozici měřidlo pro měření charakteristického rozměru (DT- t je index = 1 pro délku, DT = 2 pro plochu, DT =3 pro objem), které má velikost Q. Velikost objektu je pak počítána dle $N(Q) \cdot Q$ kde $N(Q)$ je počet velikostí měřidla potřebných k pokrytí celého objektu.

Protože tyto útvary nelze popsat pouze topologickou dimenzí, zavádí se tzv. fraktální dimenze neboli fraktální rozměr. Tento rozměr se určuje jako limita.

$$DF = - \lim_{Q \rightarrow 0} \left(\frac{\log(N(Q))}{\log(1/Q)} \right) \quad (17)$$

Také plocha některých objektů v přírodě, které mají konečný objem, může být nekonečná (nebo až o několik řádů větší, než bychom zprvu očekávali). Například povrch planety je teoreticky nekonečný. Zdálo by se, že planeta vypadá jako dokonalá koule (či rotační elipsoid). Při určitém přiblížení rozeznáme vrcholky hor a velká údolí. Při dalším přiblížení zjistíme, že každá hora je velmi členitá a její plocha je obdobně členitá jako povrch celé planety. Každý kámen potom vypadá jako celá hora, ale je mnohem menší. S touto změnou měřítka můžeme pokračovat dále až do subatomárních struktur. Ve všech těchto případech jde o praktickou aplikaci fraktálů v přírodě.

Hausdorffova dimenze

Měřením délky geometricky hladké křivky, která má dimenzi 1, dostaneme při měření v různých měřítkách vždy stejné konečné číslo. Měřením délky ostrova se při zmenšování měřítka toto číslo stává nekonečně velkým. Pobřeží tedy v rovině zabírá více místa než hladká křivka. Nezabírá však všechno místo (nevyplňuje celou rovinu). Jeho skutečná dimenze je tedy větší než dimenze křivky (ta je rovna jedné) a současně je menší než dimenze roviny (ta je rovna dvěma). Z toho jasně vyplývá, že dimenze takového útvaru není celočíselná. Toto neceločíselné číslo se nazývá Hausdorffovou dimenzí.

Hodnota Hausdorffovy dimenze udává, s jakou rychlostí délka těchto útvarů (či odpovídající veličina při větším počtu rozměrů) roste do nekonečna. Jestliže se bude Hausdorffova dimenze a topologická dimenze lišit velmi málo, bude takový objekt málo

členitý. Bude-li Hausdorffova dimenze podstatně větší než dimenze topologická, bude objekt velmi členitý. Hausdorffova dimenze se někdy nazývá též fraktální dimenze.

Mandelbrotova definice pojmu fraktál: Fraktál je množina, jejíž Hausdorffova dimenze je větší než dimenze topologická.[5]

Měření Hausdorffovy dimenze

Nejjednodušším příkladem bude zřejmě úsečka. Vytvoříme úsečku, která má jednotkovou délku. Nyní tuto úsečku rozdělíme na N dílů. To odpovídá tomu, jako bychom se na úsečku podívali s N -násobným zvětšením. Měřítko nové úsečky se tedy vypočítá takto:

$$s = \frac{1}{N} \quad (18)$$

kde s je měřítko a N je počet dílů, na které se těleso rozdělí.

Pro Hausdorffovu dimenzi obecně platí následující podmínka:

$$N * s^D = 1 \quad (19)$$

Z toho vyplývá, že Hausdorffova dimenze se pro dané dělení N a dané měřítko s vypočítá pomocí následujících vzorců:

$$N * s^D = 1 \quad (20)$$

$$\log N * s^D = \log 1 \quad (21)$$

$$\log N + \log s^D = 0 \quad (22)$$

$$\log N + D * \log s = 0 \quad (23)$$

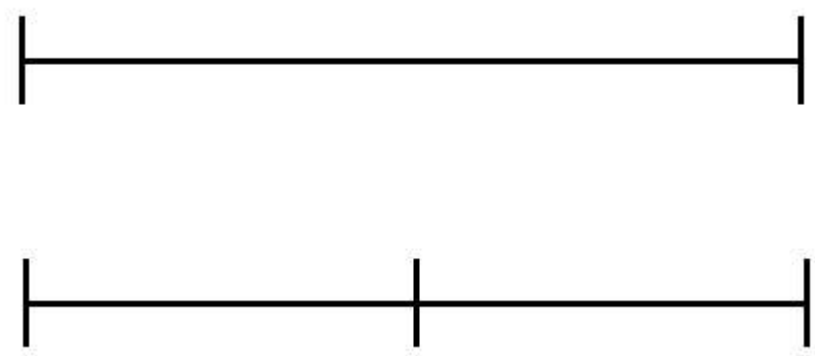
$$D * \log s = -\log N \quad (24)$$

$$D = \frac{-\log N}{\log s} \quad (25)$$

$$D = \frac{\log N}{\log \frac{1}{s}} \quad (26)$$

Po dosazení do vzorce:

$$D = \frac{\log N}{\log \frac{1}{s}} = \frac{\log N}{\log N} = 1 \quad (27)$$



Obr. 7: Rozdělení úsečky se změnou měřítka

Topologickou dimenzi úsečky známe, je rovna jedné. Hausdorffovu dimenzi jsme nyní vypočítali a je také rovna jedné. Hausdorffova dimenze se tedy rovná dimenzi topologické. Z definice fraktálu jasně vyplývá, že úsečka není fraktál (pro fraktál musí být Hausdorffova dimenze podstatně větší než dimenze topologická).

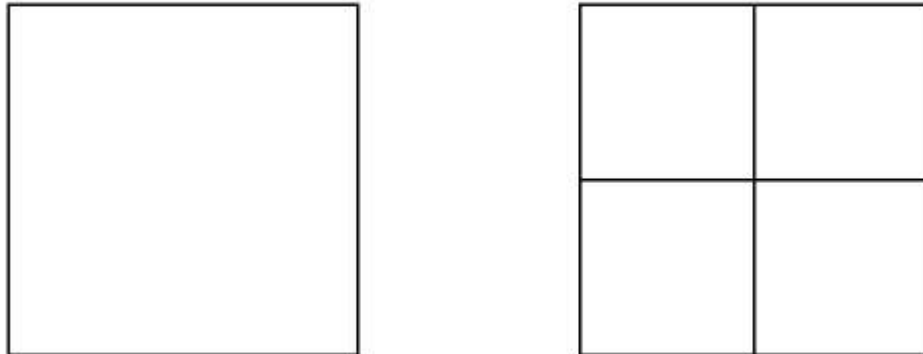
Čtverec

Dalším typickým tvarem, jehož Hausdorffovu dimenzi budeme zkoumat, je čtverec. Zkonstruuje čtverec, jehož hrany budou mít jednotkovou délku. Tento čtverec má plochu také jednotkovou. Po dvojnásobném zjemnění čtverec vypadá tak, jako by měl čtyřnásobnou plochu. Měřítka se tedy musí změnit podle tohoto vztahu:

$$s = \frac{1}{\sqrt{N}} \quad (28)$$

Hausdorffova dimenze čtverce se vypočítá:

$$D = \frac{\log N}{\log \frac{1}{s}} = \frac{\log N}{\log \sqrt{N}} = \frac{1}{\frac{1}{2}} = 2 \quad (29)$$



Obr. 8 Rozdělení čtverce se změnou měřítka

Topologická dimenze čtverce je rovna dvěma, neboť se jedná o plošný útvar. Hausdorffova dimenze čtverce je taktéž rovna dvěma, proto čtverec opět není, za použití předchozí definice, fraktálem.

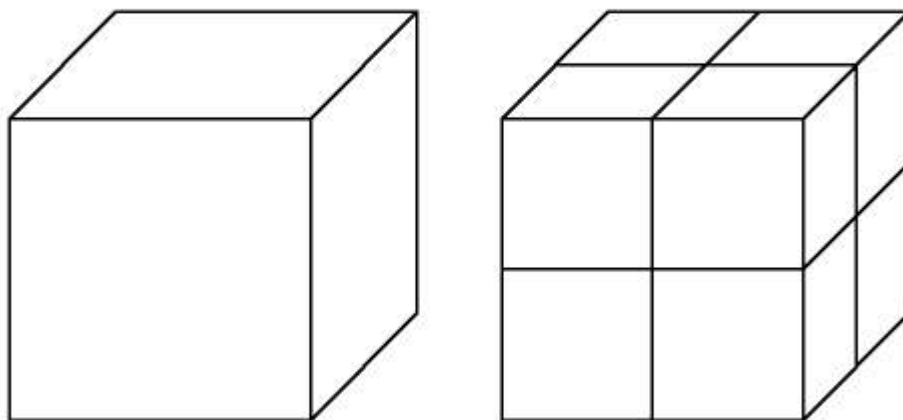
Krychle

Pro vyšší dimenze vypadá výpočet obdobně, například pro krychli. S rozdělením krychle na díly se výsledné krychličky zmenší o třetí odmocninu z N . Měřítka se vypočítá:

$$s = \frac{1}{\sqrt[3]{N}} \quad (30)$$

Hausdorffova dimenze krychle se vypočítá:

$$D = \frac{\log N}{\log \frac{1}{s}} = \frac{\log N}{\log \sqrt[3]{N}} = \frac{1}{\frac{1}{3}} = 3 \quad (31)$$

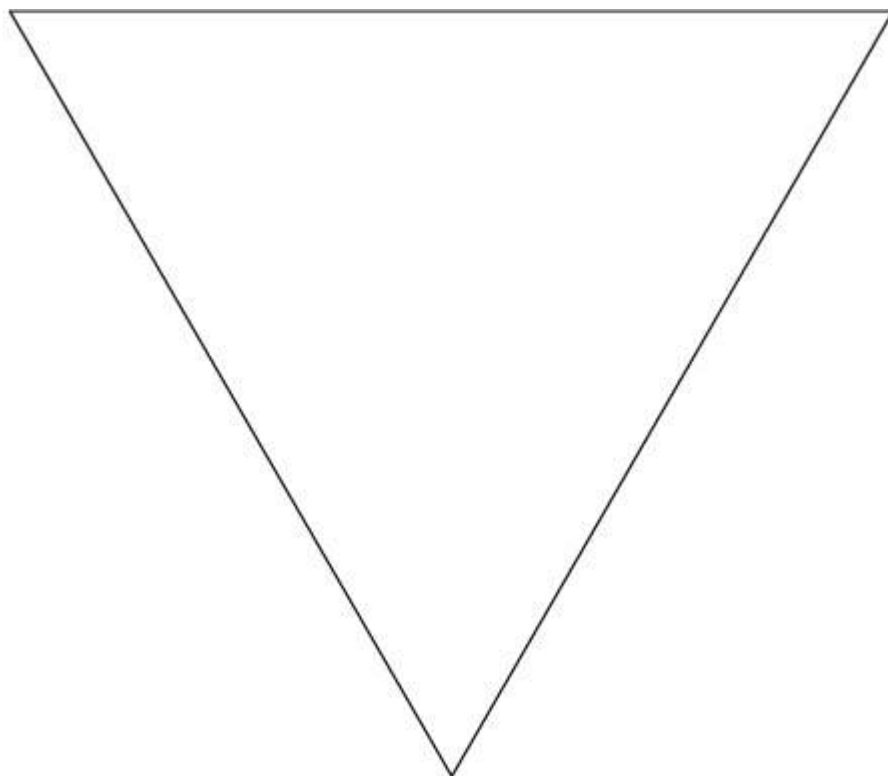


Obr. 9 Rozdělení krychle se změnou měřítka

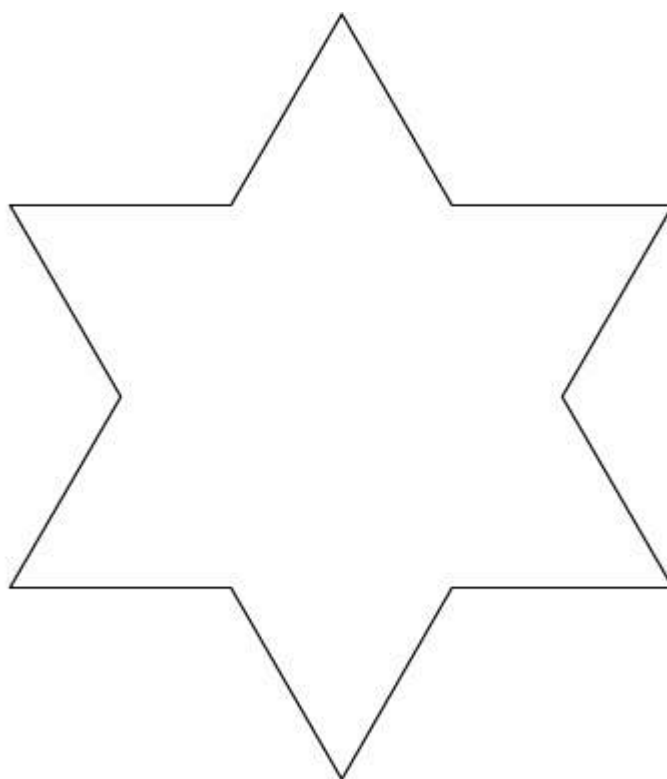
Topologická dimenze krychle je rovna třem, neboť se jedná o útvar v prostoru. Hausdorffova dimenze krychle je taktéž rovna třem, krychle tedy také není fraktálem.

Křivka Kochové

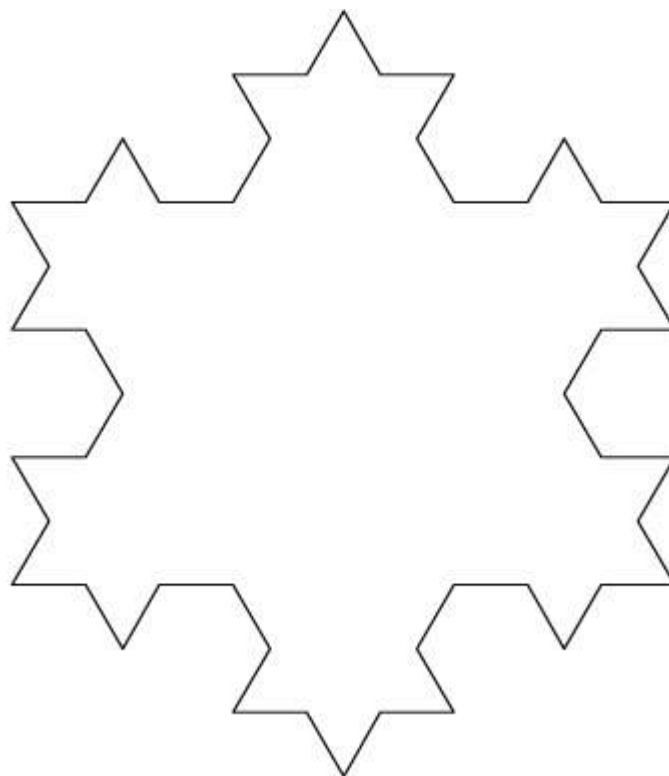
Nyní zkusíme vypočítat Hausdorffovu dimenzi útvaru, jehož zjemnění o jeden krok spočívá v tom, že se každá úsečka předchozího útvaru nahradí dvěma úsečkami se třetinovou délkou a rovnostranným trojúhelníkem sestrojeným uprostřed mezi dvěma novými úsečkami (viz následující obrázky). Tento objekt se nazývá vločka či křivka Kochové.



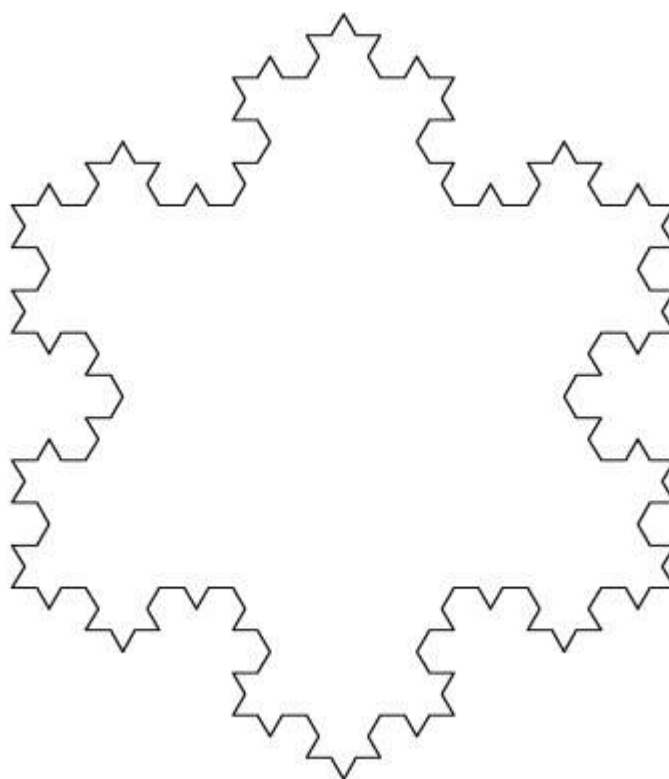
Obr. 10 První iterace křivky Kochové



Obr. 11 Druhá iterace křivky Kochové



Obr. 12 Třetí iterace křivky Kochové



Obr. 13 Čtvrtá iterace křivky Kochové

Při trojnásobném zjemnění se délka zvětší čtyřikrát, proto Hausdorffova dimenze není celé číslo:

Pro $N=4$ se tedy měřítko musí zmenšit na třetinu:

$$s = \frac{1}{3}, \dots N=4 \quad (31)$$

Hausdorffova dimenze se tedy vypočítá jako:

$$D = \frac{\log N}{\log \frac{1}{s}} = \frac{4}{3} = 1,2618595 \quad (32)$$

Topologická dimenze této křivky je rovna jedné, Hausdorffova dimenze je větší než jedna. Z toho vyplývá, že křivka Kochové je fraktál.

Křivka Kochové má i další zajímavé vlastnosti. Mezi ně patří to, že sice je v celém svém rozsahu spojitá, ale v žádném bodě nemá derivaci. Každý bod na křivce je totiž po nekonečně mnoha transformacích průnikem dvou nekonečně malých úseček, které tvoří strany trojúhelníka, který je taktéž nekonečně malý. Křivka Kochové je také nekonečně dlouhá, i když zabírá konečný prostor, jak je vidět z obrázku.

Soběpodobnost

Dalším pojmem, o kterém se musíme při popisování fraktálů zmínit, je soběpodobnost. Soběpodobnost je taková vlastnost objektu, že objekt vypadá podobně, ať se na něj díváme v jakémkoliv zvětšení.

Soběpodobnost je hlavním znakem fraktálních útvarů a většinou je také považována za jejich definici. Takto definovaná množina má několik velmi zajímavých vlastností:

- Soběpodobná množina vzniká opakováním sebe sama při určité transformaci (změna měřítka, rotace, posunutí, zkosení).

- Soběpodobné množiny jsou invariantní vůči změně měřítka. Při libovolném zvětšení, či zmenšení vypadají podobně.
- Soběpodobná množina vzniká sama ze sebe, respektive vzniká opakováním téhož motivu.

Princip opakování podobných tvarů ve zmenšené podobě je vidět prakticky u jakékoliv komplexní, složité struktury, která je vytvářena i pomocí velmi jednoduchých pravidel. Způsob, jakým probíhá větvení stromů či cév a žil v tělech živočichů, nebo hromadění bakterií a řas v koloniích, se dá matematicky uspokojivě popsat pouze fraktální geometrií. Fraktály však slouží i k modelování a pochopení složitých dějů, které se odehrávají v čase, jedná se tedy o jevy dynamické.

Odhad fraktálního rozměru

Vhodný způsob charakterizace hladkosti izotropního povrchu je Hausdorffův způsob odhadu fraktálního rozměru. Když je povrch velmi hladký, fraktální rozměr je roven 2 ($D_p\text{-index}=2$). Pro extrémně hrubé povrchy se fraktální rozměr blíží hodnotě ($D_p=3$). V měření profilu povrchu (odchylka tloušťky $R(h)$), jsou data dostupná díky jednodimenzionální křivce přetínající povrch. 2D fraktální rozměr D je potom číslo mezi 1 (hladké povrchy) a 2 (drsné povrchy). Když je povrch modelován stacionární, izotopickou gaussovskou rovinou, potom platí vztah

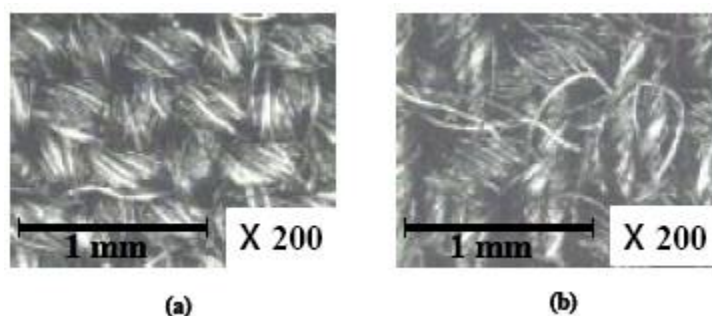
$$D_p\text{-index} = D + 1 \quad (33)$$

Při měření profilu povrchu (tloušťková odchylka $R(h)$) jsou dostupná data v jedné obrysové čáře přetnutého povrchu. Tyto data reprezentují zakřivení v ploše (plochy). Fraktální dimenze (objem) D_f je poté číslo mezi 1 (pro hladkou křivku) a 2 (pro hrbolatou křivku). [7]

4.3 Vztah drsnost a chlupatost

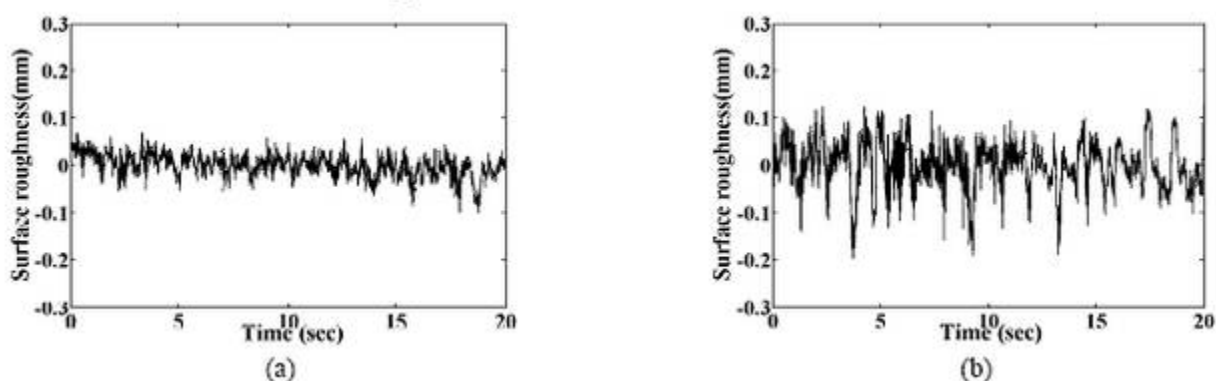
Mikroskopické fotografie oblekových tkanin (Obr. 14) ukazují povrchovou kvalitu. Tkanina (a) je poměrně plochá a má menší chlupatost než tkanina (b), která je drsná a

má větší chlupatost. První tkanina je měkká a hladká a druhá je tuhá a hrubá. Dříve jmenovaný je měkký a hladký a druhý je tuhý a hrubý.



Obr.14 Optická mikroskopická fotografie tkanin

Obr.15 ukazuje pokřivení směrového profilu z obr. 14, kde hodnota SMD (Standardní hodnota střední odchylky SMD je vypočítána jako počet kvantitativních drsností povrchu z měřených dat) je 0,07 mm a rozdílná hodnota mezi vrcholy 0,9mm u tkaniny (a) a 2,88mm u tkaniny (b). Druhá tkanina má větší hodnotu a je tudíž drsnější a hrubější. To nezahrnuje pouze hodnotu drsnosti povrchu, ale také účinek chlupatosti



Obr. 15 Profil drsnosti povrchu ve směru osnovy z obr. 14 (a) a 14(b) navzájem.

5. Experiment

5.1 Charakteristika vzorků

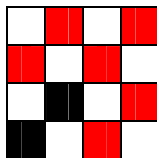
K experimentu bylo vybráno osm vzorků síťovin s označením 31HD, PES, PAD, PP21, 130T, 26S, 63M a 53S. Vzorky jsou zřetelně na omak různě drsné.

Vazba tkanin

Plátňová vazba u tkanin s označením: 26S
53S
63M
PP21
PAD
PES

Plátno 1_____

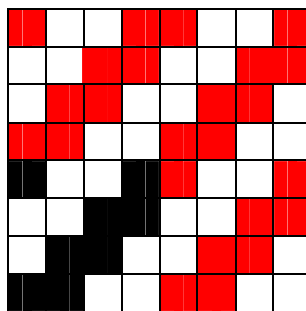
1



Keprová vazba u tkaniny s označením: 31HD
130T

Zesílený kepr 2_____ Z

2



Materiálové složení

Pomocí různého bodu tání a průběhu křivek (viz. Příloha 1.) bylo zjištěno materiálové složení vláken.

Tab. 1 Materiálové složení síťovin

Druh tkaniny	Materiál
26S	PAD
53S	PAD
31HD	PES
63M	PAD
130T	PAD
PAD	PAD
PP21	POP
PES	PES

Tloušťka vzorků

Hodnocení tloušťky bylo provedeno na tloušťkoměru podle normy ČSN EN ISO 5084.

Tab. 2 Tloušťka tkanin

Vzorek	Průměrná tloušťka v mm
26S	0,182
53S	0,070
31HD	0,258
63M	0,084
130T	0,067
PAD	0,082
PP21	0,152
PES	0,091

Dostava

Tab. 3 Dostava tkanin

Druh tkaniny	Dostava na cm
26S	26
53S	53
31HD	31
63M	63
130T	130
PAD osnova	32
PAD útek	35
PP21	21
PES osnova	32
PES útek	35

Jemnost vláken

Z naměřených hodnot získaných na obrazové analýze byla podle vztahu:

$$t = \rho * S \quad (34)$$

kde: t jemnost v tex
 ρ měrná hmotnost vlákna v kg m^{-3}
 s plocha příčného řezu vláken v mm^2

vypočtena jemnost vláken v osnově a útku. Za měrnou hmotnost byla dosazena hodnota

z tabulek : PAD $\rho=1140 \text{ kg m}^{-3}$
 PES $\rho=1380 \text{ kg m}^{-3}$
 POP $\rho=910 \text{ kg m}^{-3}$

Tab. 4 Jemnost multifilů v tkaninách

Druh tkaniny	Průměrná jemnost vláken v tex
26S osnova	8,93
26S útek	9,52
53S osnova	2,24
53S útek	2,48
31HD osnova	12,17
31HD útek	24,66
63M osnova	2,46
63M útek	2,52
130T osnova	1,14
130T útek	1,28
PAD osnova	2,08
PAD útek	2,36
PP21 osnova	4,48
PP21 útek	4,63
PES osnova	3,46
PES útek	3,59

5.2 Postup měření na RCM systému a obrazové analýze

Kalibrace

Cílem kalibrace je přiřadit obrazovému bodu reálnou jednotku. Nová kalibrace se provádí pomocí funkce kalibrace. Ke kalibraci se používá běžné mikrometrické měřítko, na které se zaostří při daném objektivu a dílkům měřítka na obraze se přiřadí reálná hodnota pomocí definice kalibrace. Hotové kalibrace se uchovávají při použití různých objektivů v paměti počítače. Před každým měřením je třeba zvolit kalibraci příslušející použitému zvětšení mikroskopu a ověřit její správnost

Snímání obrazu

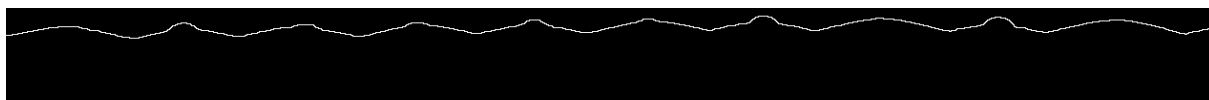
Příprava vzorků síťovaných textilií upevněním vzorku do zařízení RCM systému. Vzorek musí být napnut, aby nevznikalo nežádoucí zvlnění při posunu motorkem. Seřízení připraveného preparátu do zorného pole kamery a zaostření na hranu vzorku. Osvětlení bylo změněno z původního nastavení RCM systému. Nejlepší způsob umístění zdroje světla byl za vzorkem proti kameře, tak vzniká kontrast s pozadím a snímek, kde je zřetelně vidět zlom textilie přes hranu. Nastaven kontrast kamery a velikosti osvitu tak, aby nedocházelo k přílišnému přesvětlení preparátu.

Zařízení RCM spolu s obrazovou analýzou snímá vzorky jako sekvenci několika obrázků. Při samotném spuštění nesmí na zařízení působit žádné otřesy, jinak dojde k rozostření některé části sekvence. Sekvence (digitalizace obrazu) byla uložena k dalšímu zpracování. Postup je opakován s každým vzorkem.

Práce s nasnímaným obrazem

Nasnímané sekvence v systému NIS byly dále upravovány v obrazové analýze, tak aby byl získán požadovaný obraz, sloužící jako vstupní hodnota pro výpočet povrchových charakteristik. Obrazová sekvence byla upravena prahováním a obraz

vyčištěn tak aby byla získána kontura měřené tkaniny. Dále byly křivky kontury uloženy v binárním obraze. Ze sekvence křivek kontrur byl rekonstruován obraz povrchu textilie obr. 16, které dále slouží jako vstupní data pro výpočet drsnosti v programu MATLAB 7.1



Obr. 16 Kontura povrchu tkaniny v binárním obraze

Rozsah zkoušky

Z každého druhu síťované textilie bylo nasnímáno 200 obrazů s cílem získat 150 zřetelných snímků z každého typu textilie. Posun jednoho kroku motorku byl 0,0688mm a kalibrace měřítka byla $3 \cdot 10^{-3}$ mm/pix.

5.3 Způsob zpracování profilu

Pro výpočet výše uvedených statistických charakteristik drsnosti byl použit program RELIEFMAN v Matlabu 7.1, vytvořený na katedře textilních materiálů (viz příloha č.2.).

5.4 Výsledky a diskuze

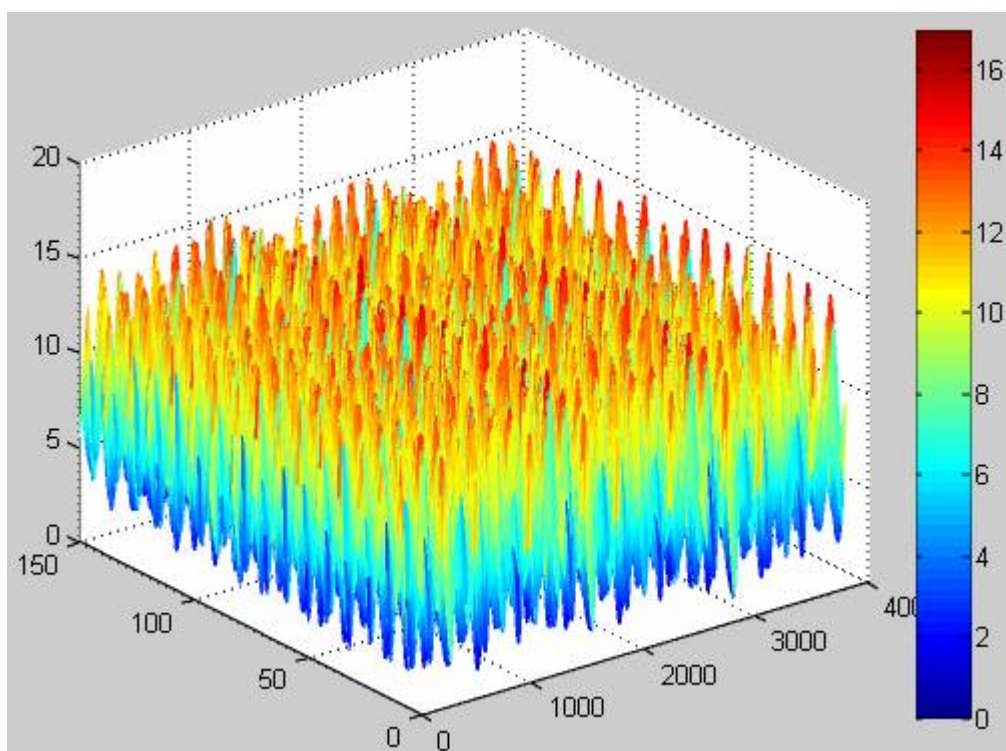
5.4.1 Výsledky měření

Vypočítané výsledky měření zobrazuje tab. 5.

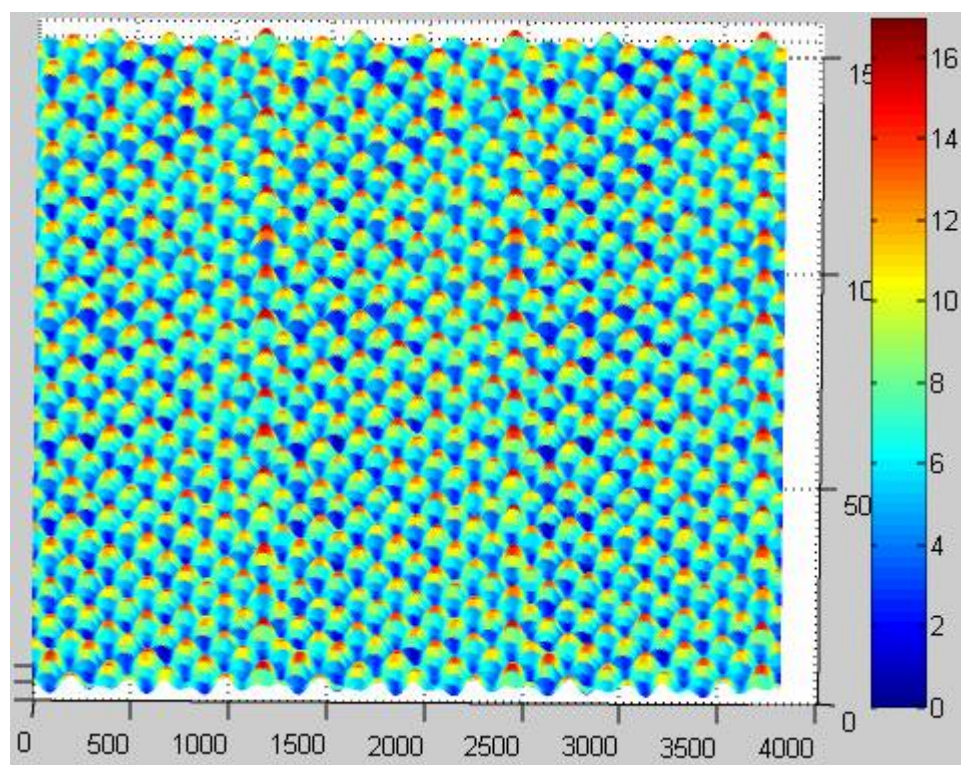
Tab. 5 Vypočítané hodnoty povrchových charakteristik

Výsledky	26S	31HD	130T	PES	PAD	53S	PP21	63M
Průměr arit.	10,919300	16,861500	7,986790	7,315820	6,667990	16,751200	18,318400	16,485800
Průměr geom.	10,328000	14,885300	7,317560	6,604490	6,087550	14,844600	16,456600	14,514900
MAD	2,592560	5,928610	2,553540	2,510080	2,161640	6,357720	6,420840	6,394640
MS	0,072157	0,110539	0,048602	0,074565	0,068199	0,182523	0,130652	0,233811
PSC	0,007818	0,017391	0,003280	0,008090	0,006623	0,042484	0,026251	0,070183
PS	0,003395	0,003335	0,001112	0,002681	0,002663	0,005625	0,004883	0,009103
Rozptyl	10,390500	47,042400	8,872190	9,338680	6,795340	53,106800	60,112700	56,373800
Šikmost	0,109512	-0,402204	0,059209	0,443129	0,357302	0,055544	0,361555	0,232458
Špičatost	2,689500	1,953220	1,924810	2,437250	2,321600	1,796290	2,325930	1,998970

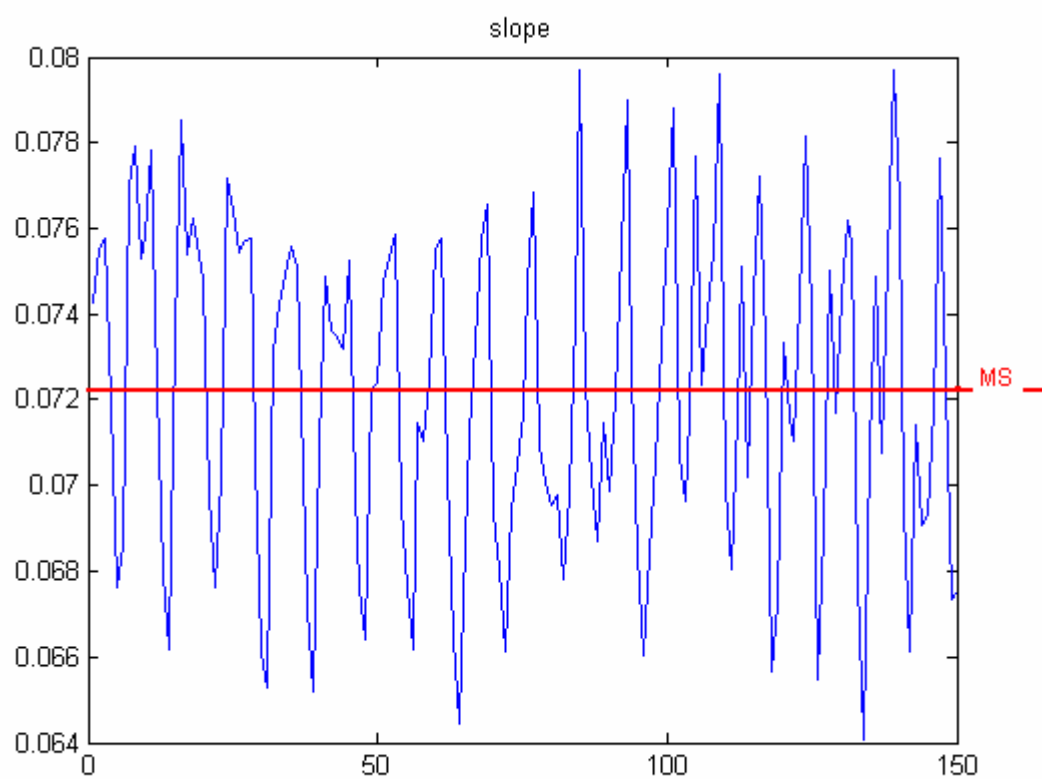
Na základě vstupních profilů byl vytvořen povrch tkaniny. Prostorový povrch tkaniny je obr. 17 a jeho rotace pro zobrazení plátňové vazby je obr. 18.



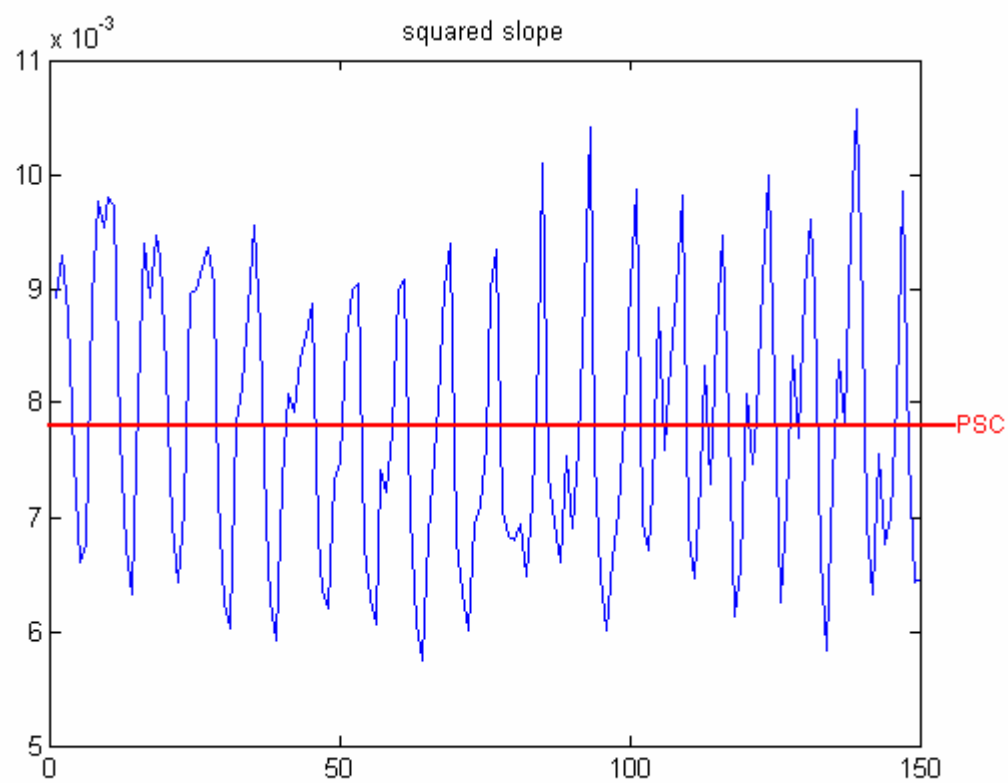
Obr. 17 Modelace povrchu síťované textilie



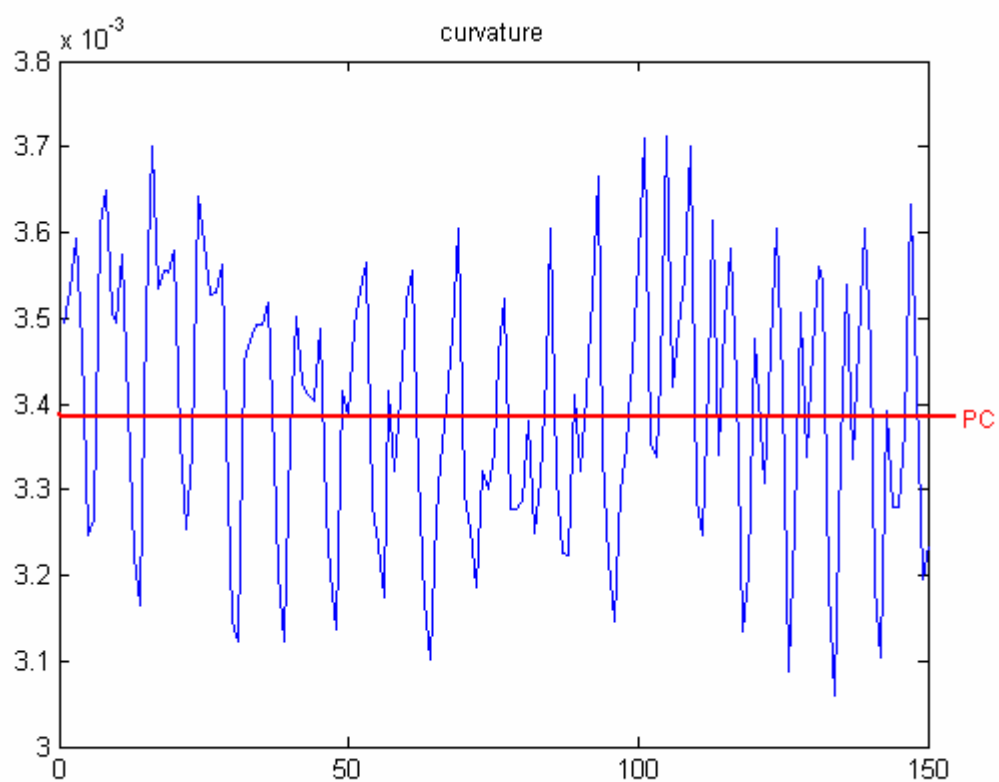
Obr. 18 Pohled na povrch tkaniny plátnové vazby otočením obr. 17
Lze vidět také výškovou odchylku odlišenou barevně.



Obr. 19 Směrnice profilu



Obr. 20 Čtverec směrnice profilu



Obr. 21 Křivost profilu

Na obrázcích 19 – 21 lze vidět směrnice profilu, čtvercové směrnice profilu a křivost s vyznačenými hodnotami (červenou čarou) příslušného průměru všech tří veličin MAD, PSC, PC spočítaných u vzorku 26S.

Podrobné výsledky všech vzorků v tabulce jsou uvedeny v příloze 3 a veškeré obrázky a grafy rozdělené podle vzorků jsou uvedeny v příloze 4.

5.4.2 Diskuze

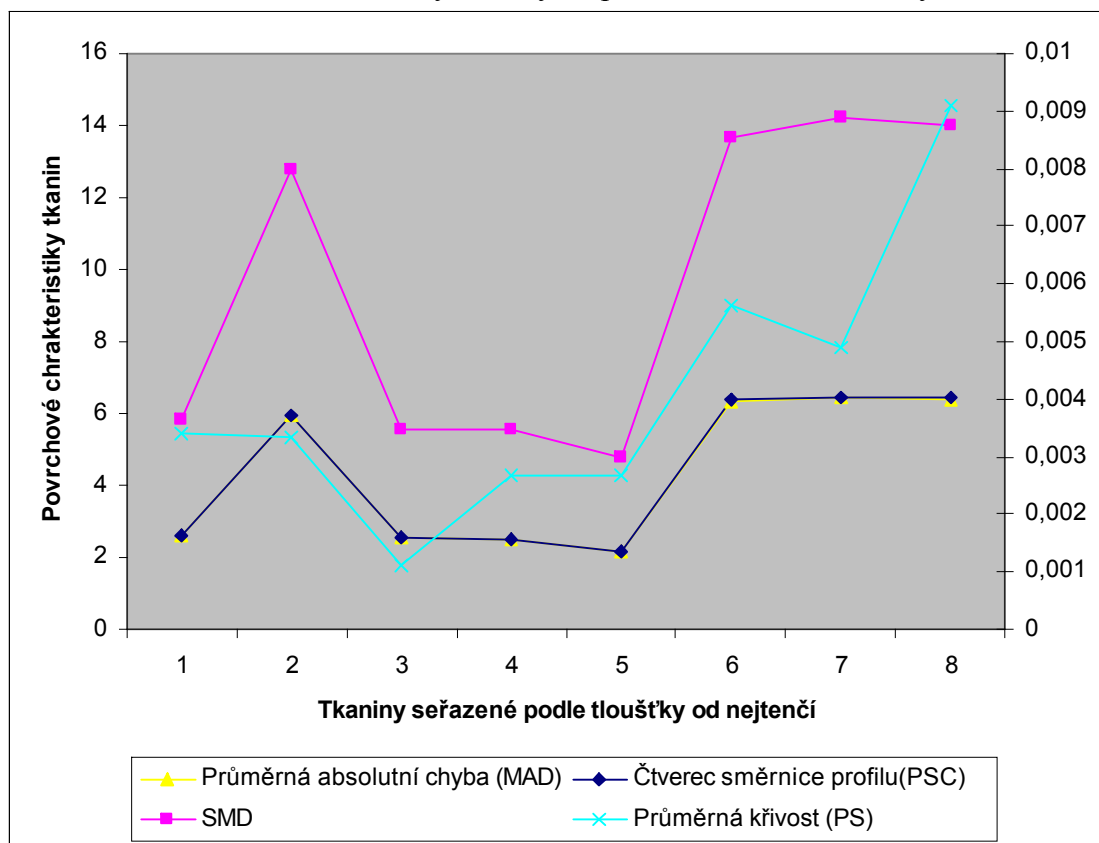
Jedno číslo pro obecné rozdělení drsnosti textilních vzorků od nejdrsnějšího po nejhladší zřejmě nelze vybrat. Na základě více vypočtených povrchových charakteristik a výpočtu fraktální dimenze byly vzorky seřazeny do tabulky (tab. 6) vzestupně podle parametrů povrchových charakteristik. Uspořádání vzorků v tabulce se mění vlivem charakterů výsledků.

Tab. 6 Vliv výpočtů charakteristik a fraktálů na vzorky

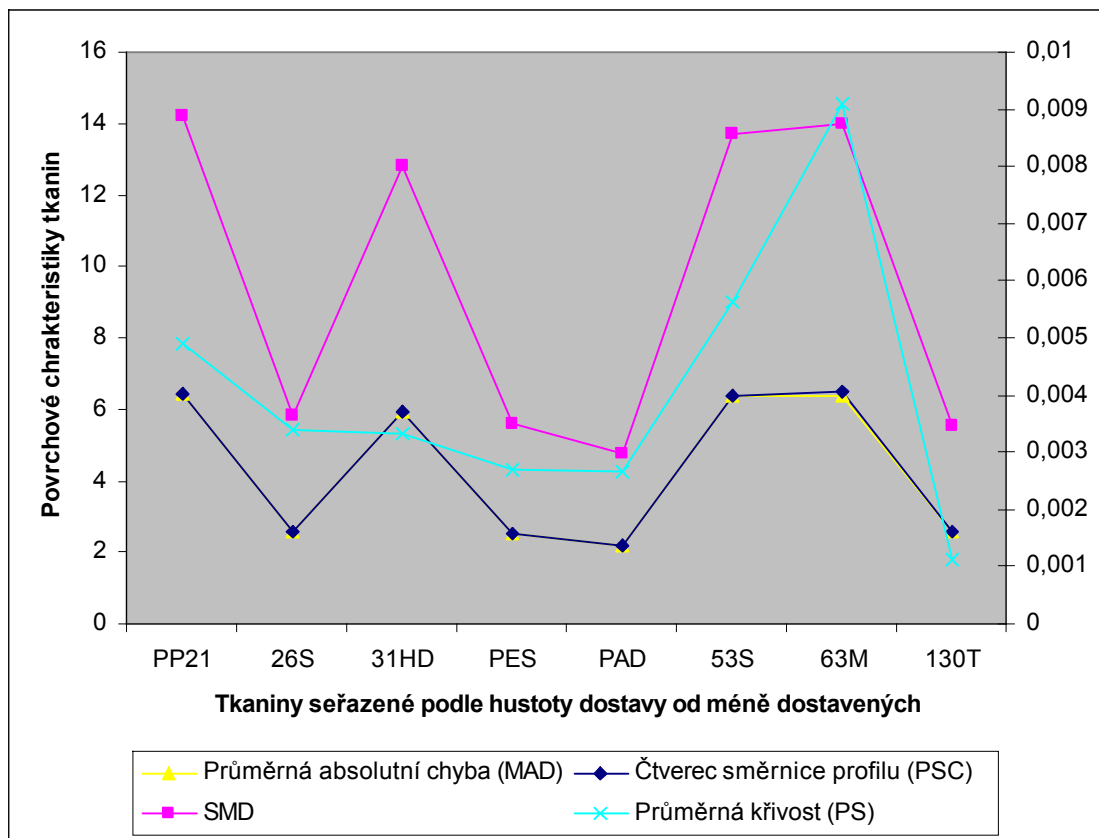
Povrchové charakteristiky	Vzorky seřazené vzestupně z leva do prava							
Arit. průměr povrchových výšek	PAD	PES	130T	26S	63M	53S	31HD	PP21
Geom. průměr povrchových výšek	PAD	PES	130T	26S	63M	53S	31HD	PP21
MAD	PAD	PES	130T	26S	31HD	53S	63M	PP21
SD	PAD	130T	PES	26S	31HD	53S	63M	PP21
TP	PAD	130T	PES	26S	31HD	53S	63M	PP21
PC	130T	PAD	PES	31HD	26S	PP21	53S	63M
PSC	130T	PAD	26S	PES	31HD	PP21	53S	63M
MS	130T	PAD	26S	PES	31HD	PP21	53S	63M
Fraktální rozměr								
D rows	26S	130T	PAD	31HD	PES	PP21	53S	63M
D cols	26S	130T	PAD	31HD	PES	PP21	53S	63M
D diag	26S	130T	PAD	31HD	PES	PP21	53S	63M
D omni	26S	130T	PAD	31HD	PES	PP21	53S	63M

Vypočítané hodnoty povrchových charakteristik byly srovnány s parametry síťovaných textilií. Hodnoty průměrných aritmetických a geometrických výšek, průměrná absolutní chyba (MAD) a průměrná křivost byly srovnány s tloušťkou tkanin, dostavou tkanin a jemností monofilu v osnově všech tkanin. Parametry tkanin byly vždy srovnány od nejmenších hodnot po největší.

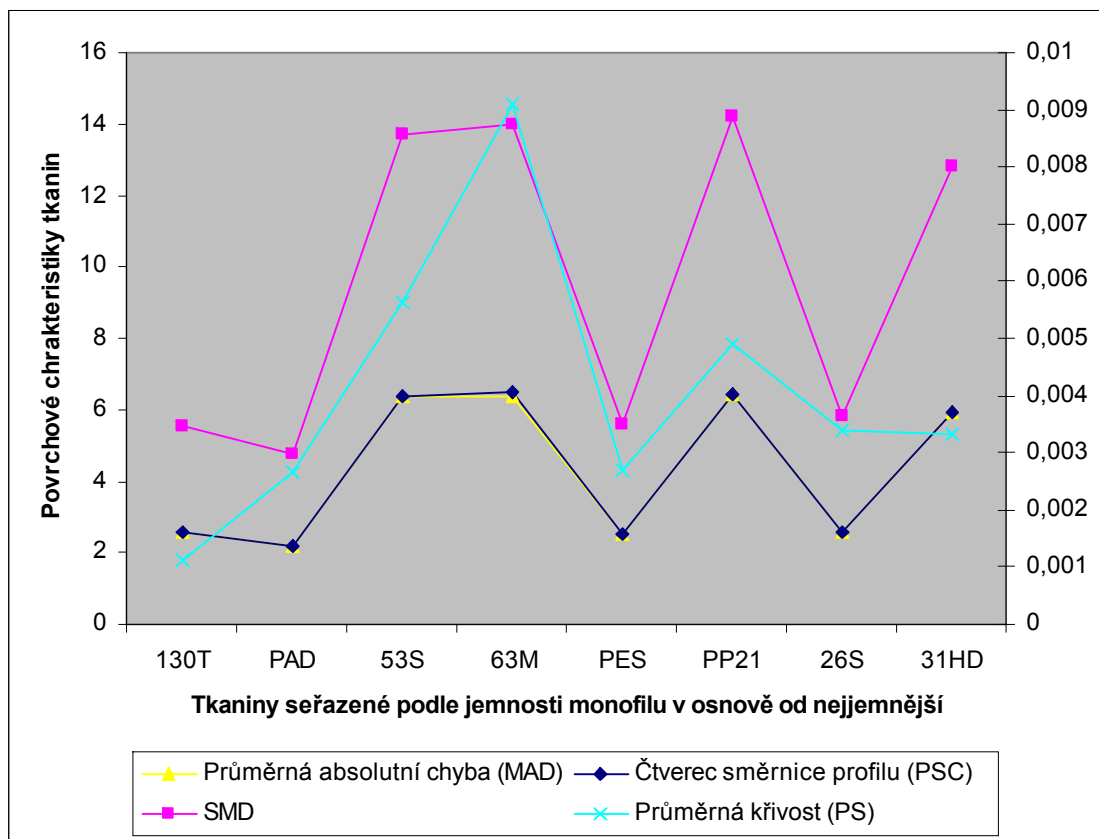
Graf 1 Vliv tloušťky tkaniny na povrchové charakteristiky



Graf 2 Vliv hustoty dostavy na povrchové charakteristiky



Graf 3 Vliv jemnosti monofilů na povrchové charakteristiky



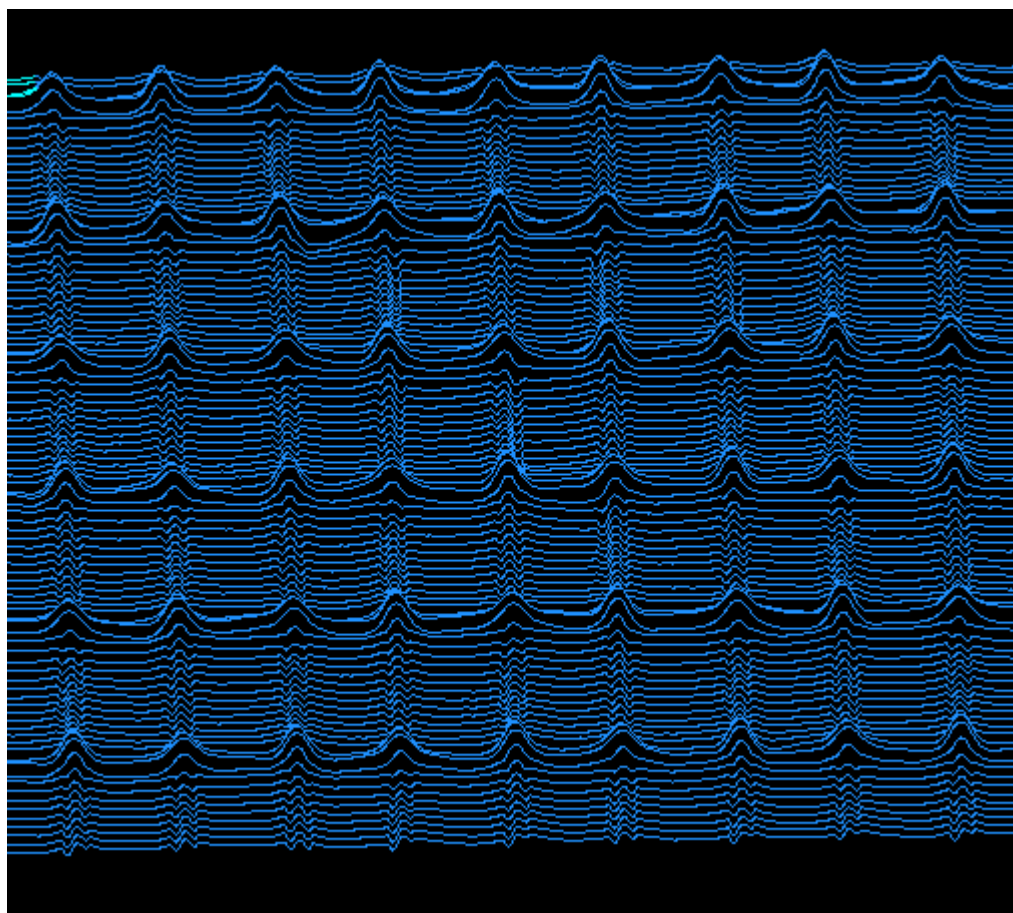
Pro porovnání jednotlivých parametrů textilie a povrchových charakteristik byla použita vzájemná korelace. Korelační analýza ukazuje stupeň závislosti. Výsledkem je korelační koeficient, který nabývá hodnot od (-1,1). Hodnota -1 značí nepřímou závislost, hodnota 1 přímou závislost a hodnota 0 pak nevykazuje žádnou statistickou závislost.

Tab. 7 Korelační závislost na parametrech textilií

Závislost	Korelační koeficient
Tloušťka - PC	-0,10
Tloušťka - MAD	0,23
Tloušťka - Čtverec směrnice profilu PSC	-0,19
Tloušťka - SMD	0,24
Dostava - PC	-0,17
Dostava - MAD	-0,16
Dostava - Čtverec směrnice profilu PSC	0,01
Dostava - SMD	-0,19
Jemnost monofilu - PC	-0,11
Jemnost monofilu - MAD	0,15
Jemnost monofilu - Čtverec směrnice profilu PSC	-0,20
Jemnost monofilu - SMD	0,16

MAD - SMD	0,99
PC - SMD	0,74
Čtverec směrnice profilu PSC - SMD	0,77
MAD -PC	0,74
MAD - Čtverec směrnice profilu PSC	0,77
PC - Čtverec směrnice profilu PSC	0,97

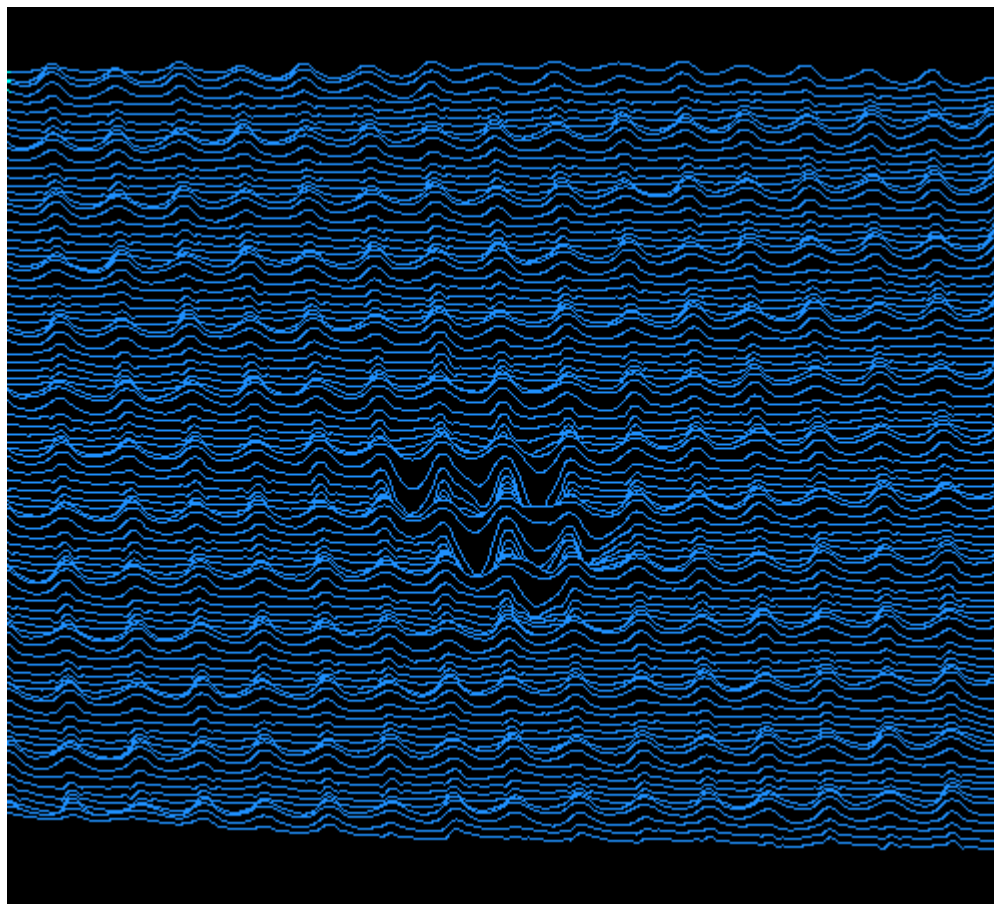
Problémem celého měření drsnosti textilií je sama textilie, která se i při bezkontaktním měření může vlivem posunu natahovat a měnit ve vazných bodech. Jako doplňkové bezkontaktní měření bylo použito optického laserového konfokálního mikroskopu, kde je zřetelně vidět struktura vzorku a její změna při manipulaci a měření na RCM systému. Původní vzorek je na obr. 22.



Obr. 22 Nepoškozený vzorek tkaniny

Parametry poškození mají vliv na změřenou výslednou povrchovou charakteristiku dojde-li k poškození před měřením nebo při něm. Drobná deformace

vzorků síťoviny je ukázána na obr. 23. Z osmi vzorků byl z tohoto hlediska nejhůře měřitelný vzorek PAD pro jeho přílišnou jemnost. Vzorky 130T, 63M a 53S pro jejich hustší dostavu přecházeli přes hranu bez poškození.



Obr. 23 Poškozená tkanina při manipulaci v RCM systému

Naopak vzorek tkaniny 31HD je velmi tuhý a neohýbá se optimálně přes hranu, což způsobuje špatné zachycení kontury povrchu.

6. Závěr

Bezkontaktní měření drsnosti otevírá prostor pro novou klasifikaci posuzování materiálů. Ty lze hodnotit z pohledu kvality, nebo zpracovatelské charakteristiky dané textilie. Systém umožňuje opakovatelnost měření a snadné nastavení jednotných podmínek měření. Při správné metodice měření představuje vcelku efektivní nástroj pro posouzení drsnosti, reliéfu a povrchové struktury textilních útvarů. Je však třeba brát

ohled na různost textilních útvarů. Textilie, které jsou příliš tuhé nebo pevné a mají špatnou tendenci se ohýbat přes měřicí hranu se pro toto měření příliš nedoporučují z důvodu špatného zachycení kontury povrchu kamerou. Stejně jako příliš jemné tkaniny (např. velmi jemné síťoviny z monofilů) se mohou při posuvu přes hranu různým způsobem natahovat či poškodit pokud nezvolíme optimální velikost ztížení udržující napětí.

Vývoj bezdotykových měřících přístrojů na měření drsnosti povrchu se v současné době zdokonaluje, a to připojením kvalitních snímacích zařízení a vyspělé výpočetní techniky s programy umožňujícími okamžité a rychlé zpracování a vyhodnocení výsledků.

Seznam použité literatury

- [1] Bumbálek B., CSc., Ing, Vladimír Odvody, Ošťádal B.: Drsnost povrchu, SNTL, Praha 1989
- [2] <<http://martin.hinner.info/math/Fraktaly/>>
- [3] Mazal M.: Popis systému pro bezkontaktní měření drsnosti a povrchových charakteristik textilií (RCM systém), Liberec 2005
- [4] Militký J.: Textilní vlákna, TU Liberec, 2002
- [5] <<http://www.fit.vutbr.cz/~tisnovpa/fract/clanky/1.htm.cs>>
- [6] < http://cs.wikipedia.org/wiki/Fourierova_transformace>
- [7] <<http://kmlinux.fjfi.cvut.cz/~pausp1/html/skola/fraktaly/reserse.htm>>
- [8] Militký J., Bajzík V.: Surface Roughness And Fractal Dimension, TU Liberec, 2002
- [9] Militký J., Mazal M.: Non contact Metod for surface roughness evaluation
- [10] Serra, J.: Image and Mathematical Morphology
- [11] Meloun M., Militký M.: Kompendium statistického zpracování, 2002
- [12] Kyung Hee Park, Zouny Ha Kwon, Kyung Wha Oh: The Surface Roughness Measurement for Textiles Fabric by a Non- Contact Metod for Tactile Perception

Seznam příloh

Příloha 1.	Bod tání polymerů
Příloha 2.	RELIEFMAN v programu MATLAB 7.1
Příloha 3.	Tabulka vypočtených hodnot všech vzorků
Příloha 4.	Obrázky a grafy z výpočtů
Příloha 5.	Vzorky textilií

Příloha 1.

Příloha 2.

```
clc;clear all;pobr=1;format compact;
warning off all;warning('off','MATLAB:dispatcher:InexactMatch');
clear,clc;
pocet_obrazku=150;
pocet_harm=30;pobr=1;

for k=1:pocet_obrazku
    kk=10000+k-1;
    name1=num2str(kk);
    name2='.bmp';
    name3='_krivka';
    NAME=[name1 name2];
    obr=imread(NAME);

    BW4=obr;BW4=BW4./255;
    [v,s]=size(BW4);nasel1=0;nasel2=0;
    for i=1:v
        if BW4(i,2)==1 & nasel1==0
            hrana1=i;
            nasel1=1;
        end
        if BW4(i,s-1)==1 & nasel2==0
            hrana2=i;
            nasel2=1;
        end
    end

    BW4(hrana1:v,1)=1;
    BW4(hrana2:v,s)=1;
    BW4(v,1:s)=1;

    BW4_1 = imfill(BW4);

    BW5 = bwperim(BW4_1,4);
    BW5_1=abs(BW5-1);

    BW5_1(1:v,1)=1;
    BW5_1(1:v,s)=1;
    BW5_1(v,1:s)=1;
    BW5_1(hrana1,1)=0;
    BW5_1(hrana2,s)=0;

    data=[];
    for j=1:s
        hrana=[];
        for i=1:v
            if BW5_1(i,j)==0
                hrana=[hrana, i];
            end
        end
        str_hrana=round(mean(hrana));
        BW5_1(1:v,j)=1;
    end
end
```

```

        BW5_1(str_hrana,j)=0;
        data=[data; j str_hrana];
    end

    data_fft=fft(data(:,2));
    data_upr=data_fft;

    data_upr(pocet_harm:length(data_upr)-pocet_harm,1)=0;
    data_ifft_u=ifft(data_upr);

    yna=detrend(data(:,2));yva=detrend(abs(data_ifft_u(:,1)));man(k,:)=yna;
    mav(k,:)=yva;
        yna=max(yna)-yna/(max(yna)-min(yna));yva=max(yva)-yva/(max(yva)-
    min(yva));

end
figure(pobr);pobr=pobr+1;
mesh(max(mav(:))-mav);
colorbar;
figure(pobr);pobr=pobr+1;
surfc(max(mav(:))-mav);
mass=(max(mav(:))-mav);
contour(mass);colormap(jet);colorbar;c1=1;title('height variation');
for ii=1:pocet_obrazku
    yad=mass(ii,:);lo=length (yad);
        xp(ii)=mean(mass(ii,:));
        xgl=(mean(log(mass(ii,:))));
        xg(ii)=exp(xgl);
        sigp(ii)=var(mass(ii,:));
        sigl(ii)=mean((mass(ii,:)-xp(ii)).^2);
        sial(ii)=mean(abs(mass(ii,:)-xp(ii)));
        slop(ii)=mean(abs(diff(mass(ii,:))./1));
        krivo(ii)=mean(abs(diff(mass(ii,:),2)./1));
        sloc(ii)=mean((diff(mass(ii,:))./1).^2);
        si(ii)=mean((mass(ii,:)-xp(ii)).^3);
        sil(ii)=si(ii)/(sigp(ii)*sqrt(sigp(ii)));
        sp(ii)=mean((mass(ii,:)-xp(ii)).^4);
        spl(ii)=sp(ii)/(sigp(ii)*sigp(ii));
        yrr=sort(mass(ii,:));
        rdol=mean(yrr(1:5,1));
        rhor=mean((yrr(length(yrr)-5:length(yrr),1)));
        rten(ii)=rhor-rdol;vkl(ii)=100*sqrt(sigp(ii))/xp(ii);
        yaa=mass(ii,:);yaa=detrend(yaa);
        N=length(yaa);if N/2>floor(N/2);N=N-1;yaa=yaa(1:N);end
        p=1:N/2+1;n=1:N;C=cos(2*pi*n'*(p-1)/N);S=sin(2*pi*n'*(p-1)/N);

A=2/N*yaa*C;B=2/N*yaa*S;A(N/2+1)=A(N/2+1)/2;
pmax=3;
Ind=A(2:N/2).^2+B(2:N/2).^2;[Inds,inde]=sort(Ind,'descend');
ynew=A(1)/2+C(:,inde(1))*A(inde(1))+S(:,inde(1))*B(inde(1));
ynew=ynew+C(:,inde(2))*A(inde(2))+S(:,inde(2))*B(inde(2));
ynew=ynew+C(:,inde(3))*A(inde(3))+S(:,inde(3))*B(inde(3));
memi(:,ii)=Ind(1:50);
faa1(ii)=A(inde(1));bb1(ii)=B(inde(1));frek1(ii)=2*pi*inde(1)/N;
faa2(ii)=A(inde(2));bb2(ii)=B(inde(2));frek2(ii)=2*pi*inde(2)/N;
faa3(ii)=A(inde(3));bb3(ii)=B(inde(3));frek3(ii)=2*pi*inde(3)/N;
end
fprintf(1, '*****.\n');
fprintf('Puvodni data .\n');

```

```

fprintf('Prumer arit. = %g.\n', mean(xp));
fprintf('Prumer geom. = %g.\n', mean(xg));
fprintf('prum. abs chyba = %g.\n', mean(sial));
fprintf('prum. smernice = %g.\n', mean(slop));
fprintf('prum. ctverec smernice = %g.\n', mean(sloc));
fprintf('prum. krivost = %g.\n', mean(krivo));
fprintf('Rozptyl = %g.\n', mean(sigp));
fprintf('Sikmost = %g.\n', mean(sil));
fprintf('Spicatost = %g.\n', mean(spl));
fprintf('Fourier B1 = %g.\n', mean(bb1));
fprintf('Fourier A1 = %g.\n', mean(faa1));
fprintf('Fourier freq1 = %g.\n', mean(frek1));
fprintf('Fourier B2 = %g.\n', mean(bb2));
fprintf('Fourier A2 = %g.\n', mean(faa2));
fprintf('Fourier freq2 = %g.\n', mean(frek2));
fprintf('Fourier B3 = %g.\n', mean(bb3));
fprintf('Fourier A3 = %g.\n', mean(faa3));
fprintf('Fourier freq3 = %g.\n', mean(frek3));
fprintf('Rz rough 10. = %g.\n', mean(rten));
fprintf('var koef. = %g.\n', mean(vk1));
figure(pobr);pobr=pobr+1;plot(slop);title('slope');
figure(pobr);pobr=pobr+1;plot(sloc);title('squared slope');
figure(pobr);pobr=pobr+1;plot(krivo);title('curvature');
figure(pobr);pobr=pobr+1
surfc(memi);
x=mass;[r s]=size (x);
xc=mean(mass(:));vac=var(mass(:));
xs=mean(mass);xr=mean(mass');
mec=median(mass(:));mes=median(mass);mer=median(mass');
for i=1:r;for j =1:s;
    mame(i,j) = mass(i,j)-(mec+(mes(j)-mec)+(mer(i)-mec));
end
end
for i=1:r;for j =1:s;
    mam(i,j) = mass(i,j)-(xc+(xs(j)-xc)+(xr(i)-xc));
end
end

mamm=medfilt2(mass,[3 3]);mamm(1,1)=mamm(2,2);mamm(1,s)=mamm(1,s-1);mamm(r,1)=mamm(r,2);
mamm(r,s)=mamm(r-1,s-1);mamml=mass-mamm;mamm2=(mass-mamm).^2;subplot(2,2,3);
contour(mamml);colormap(jet);colorbar;title('3 median smoothing residuals');
subplot(2,2,4);
contour(mamm2);colormap(jet);colorbar;title('3 median smoothing squared residuals');
rsc=sum(mam(:).^2);msc=mean(mam(:).^2);
vas=var(xs);var=var(xr);
vss=vac-vas;vsr=vac-var;
id=vac/xc;
mu=chi2inv(.025,r)/(r-1);mc=chi2inv(.97525,r)/(r-1);
idov= ((r*var+s*vas)/(r+s))/xc;
fprintf('Basic Results \n');
fprintf('overall mean = %g.\n', xc);
fprintf('residual sum of squares = %g.\n', rsc);
fprintf('mean squared residual = %g.\n', msc);
fprintf('overall variance = %g.\n', vac);
fprintf('variance machine = %g.\n', vas);
fprintf('variance transversal = %g.\n', vss);

```



```

fprintf('variance cross = %g.\n', var);
fprintf('variance longitudinal = %g.\n', vsr);
fprintf('dispersion index = %g.\n', id);
fprintf('overall dispersion index = %g.\n', idov);
fprintf('uniform below: %g.\n', mu);
fprintf('clumped above: %g.\n', mc);
fprintf('vc/vm = %g.\n', var/vas);
f=max(var/vas,vas/var);fa=finv(.975,s-1,r-1);
if f>fa; fprintf('high anisotropy \n');
else fprintf('isotropy \n');
end
ap=mass;ac=sort(ap(:));n1=length(ac);

pobr=pobr+1;
aa=ap-mean(ap(:));
ra=aa(:);n1=length(ra);nn=size(aa,1);
s1=aa';sa=s1(:);da=zeros(n1,1);
sa=s1(:);da=zeros(n1,1);
k=0;for i=1:nn
for j=1:i
k=k+1;
da(k)=aa(i-j+1,j);
end
end
k=0;for i=2:nn
for j=i:nn
k=k+1;
da(k)=aa(i-j+nn,j);
end
end
mlag=nn-2;
for j = 1:mlag
r1 = ra(1:n1-j);
r2 = ra(1+j:n1);
gr(j) = sum((r1-r2).^2)/(2*(n1-j));
r1 = sa(1:n1-j);
r2 = sa(1+j:n1);
gs(j) = sum((r1-r2).^2)/(2*(n1-j));
r1 = da(1:n1-j);
r2 = da(1+j:n1);
gd(j) = sum((r1-r2).^2)/(2*(n1-j));
end;
go = (gs + gr + gd)/3;figure(pobr);
subplot(2,2,1);
plot(0:mlag,[0 gr],'o',0:mlag,[0 gr],' :');
title('Semivariogram columns');xlabel(''), ylabel('gr(lag)');
subplot(2,2,2);
plot(0:mlag,[0 gs],'+',0:mlag,[0 gs],' :');
title('Semivariogram rows');xlabel(''), ylabel('gc(lag)');
subplot(2,2,3);
plot(0:mlag,[0 gd],'^',0:mlag,[0 gd],' :');
title('Semivariogram diags');xlabel('lag'), ylabel('gd(lag)');
subplot(2,2,4);
plot(0:mlag,[0 go], 'square',0:mlag,[0 go],' :');
title('Semivariogram omni');xlabel('lag'), ylabel('go(lag)');
pobr=pobr+1;figure(pobr);
subplot(2,2,1);
plot(log(1:mlag),log(gr),'o',log(1:mlag),log(gr),' :');
title('log Svariog columns');xlabel(''), ylabel('log gr(lag)');
subplot(2,2,2);

```

```

plot(log(1:mlag),log(gs),'+',log(1:mlag),log(gs),'');
title('log Svarlog rows');xlabel(''), ylabel('log gc(lag)');
subplot(2,2,3);
plot(log(1:mlag),log(gd),'^',log(1:mlag),log(gd),'');
title('log Svarlog diags');xlabel('log lag'), ylabel('log
gd(lag)');
subplot(2,2,4);
plot(log(1:mlag),log(go),'square',log(1:mlag),log(go),'');
title('log Svarlog omni');xlabel('log lag'), ylabel('log go(lag)');
lg=log(gr);li=log(1:mlag);
for m=2:mlag,
    pli=0;
    plg=0;
    for i=1:m;
        pli=pli+li(i);
        plg=plg+lg(i);
    end
    pli=pli/m;
    plg=plg/m;
    ci=0;
    jm=0;
    for i=1:m;
        ci=(li(i)-pli)*(lg(i)-plg)+ci;
        jm=(li(i)-pli)^2+jm;
    end
    frr(m)=3-ci/(2*jm);
end
lg=log(gs);li=log(1:mlag);
for m=2:mlag,
    pli=0;
    plg=0;
    for i=1:m;
        pli=pli+li(i);
        plg=plg+lg(i);
    end
    pli=pli/m;
    plg=plg/m;
    ci=0;
    jm=0;
    for i=1:m;
        ci=(li(i)-pli)*(lg(i)-plg)+ci;
        jm=(li(i)-pli)^2+jm;
    end
    frs(m)=3-ci/(2*jm);
end
lg=log(gd);li=log(1:mlag);
for m=2:mlag,
    pli=0;
    plg=0;
    for i=1:m;
        pli=pli+li(i);
        plg=plg+lg(i);
    end
    pli=pli/m;
    plg=plg/m;
    ci=0;
    jm=0;
    for i=1:m;
        ci=(li(i)-pli)*(lg(i)-plg)+ci;
        jm=(li(i)-pli)^2+jm;
    end

```

```

end
frd(m)=3-ci/(2*jm);
end
lg=log(go);li=log(1:mlag);
for m=2:mlag,
    pli=0;
    plg=0;
    for i=1:m;
        pli=pli+li(i);
        plg=plg+lg(i);
    end
pli=pli/m;
plg=plg/m;
ci=0;
jm=0;
for i=1:m;
    ci=(li(i)-pli)*(lg(i)-plg)+ci;
    jm=(li(i)-pli)^2+jm;
end
fro(m)=3-ci/(2*jm);
end

pobr=pobr+1;figure(pobr);
subplot(2,2,1);
plot((2:mlag),frr(2:end),'o');
title('Frac Dim columns');xlabel(''), ylabel('D');
subplot(2,2,2);
plot((2:mlag),frs(2:end),'+');
title('Frac Dim rows');xlabel(''), ylabel('D');
subplot(2,2,3);
plot((2:mlag),frd(2:end),'^');
title('Frac Dim diags');xlabel('M'), ylabel('D');
subplot(2,2,4);
plot((2:mlag),fro(2:end),'square');
title('Frac Dim omni');xlabel('M'), ylabel('D');
pobr=pobr+1;figure(pobr);
prp=0;psp=0;pop=0;pdp=0;for i=1:4
    prp=prp+frr(i);pop=pop+fro(i);psp=psp+frs(i);pdp=pdp+frd(i);
end
prp=prp/4;psp=psp/4;pdp=pdp/4;pop=pop/4;
fprintf(1, '*****.\n');
fprintf('Fractal Dimension - init .\n');
fprintf('D rows = %g.\n', psp);
fprintf('D cols = %g.\n', prp);
fprintf('D diag = %g.\n', pdp);
fprintf('D omni = %g.\n', pop);
fprintf('Fractal Dimension - full data .\n');
fprintf('D rows = %g.\n', mean(frs(2:end)));
fprintf('D cols = %g.\n', mean(frr(2:end)));
fprintf('D diag = %g.\n', mean(frd(2:end)));
fprintf('D omni = %g.\n', mean(fro(2:end)));

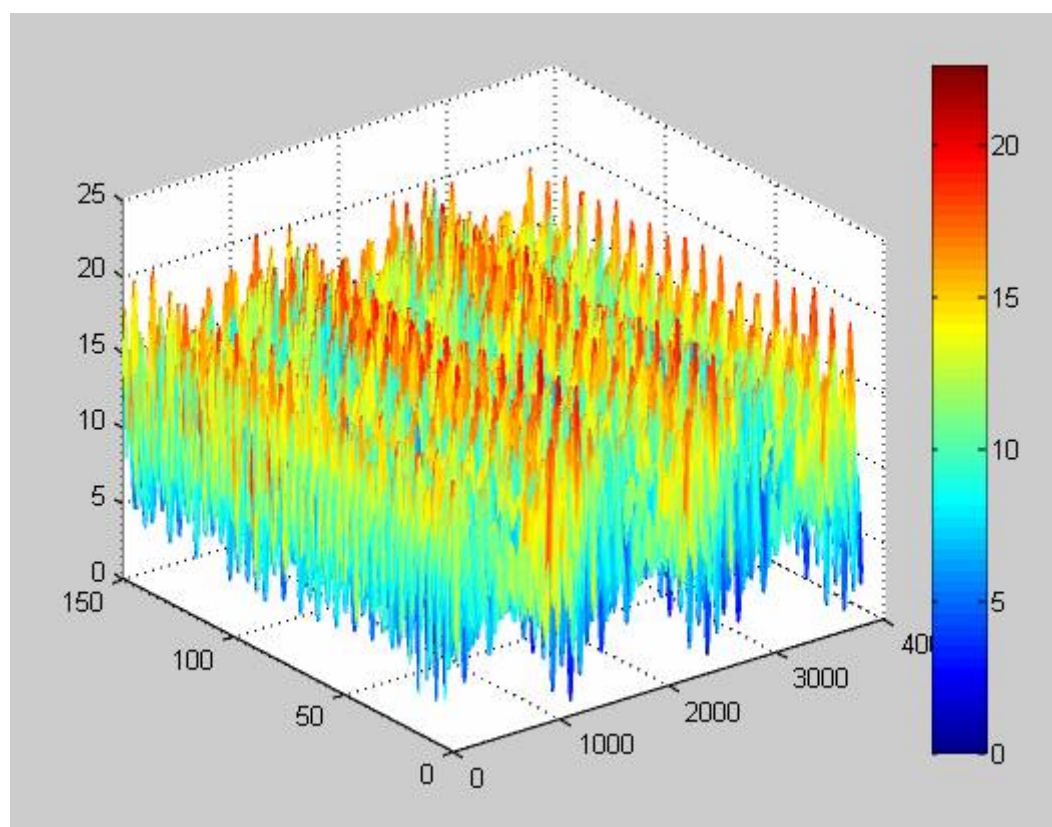
```

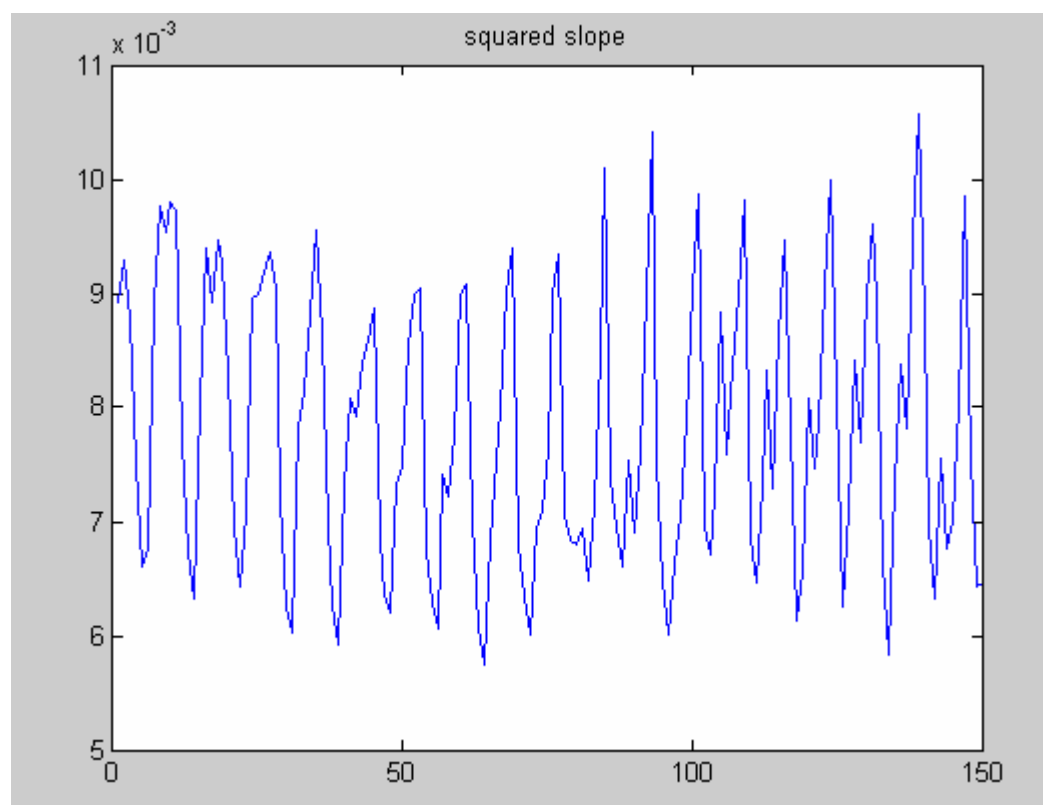
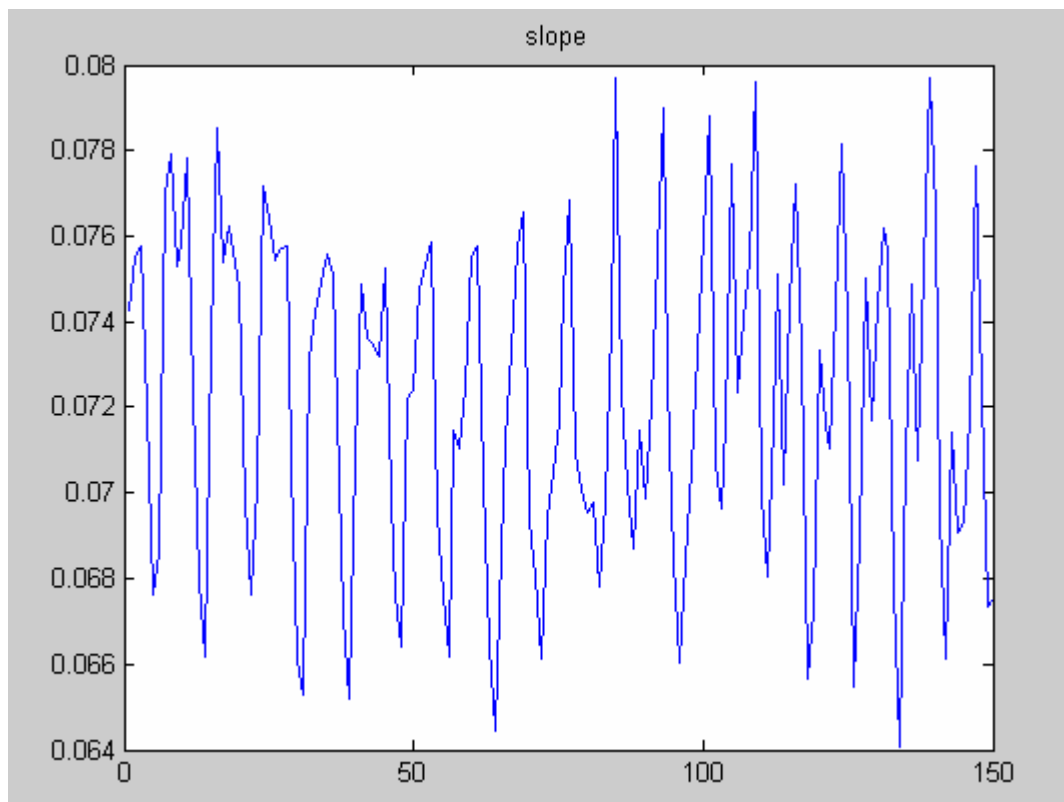
Příloha 3.

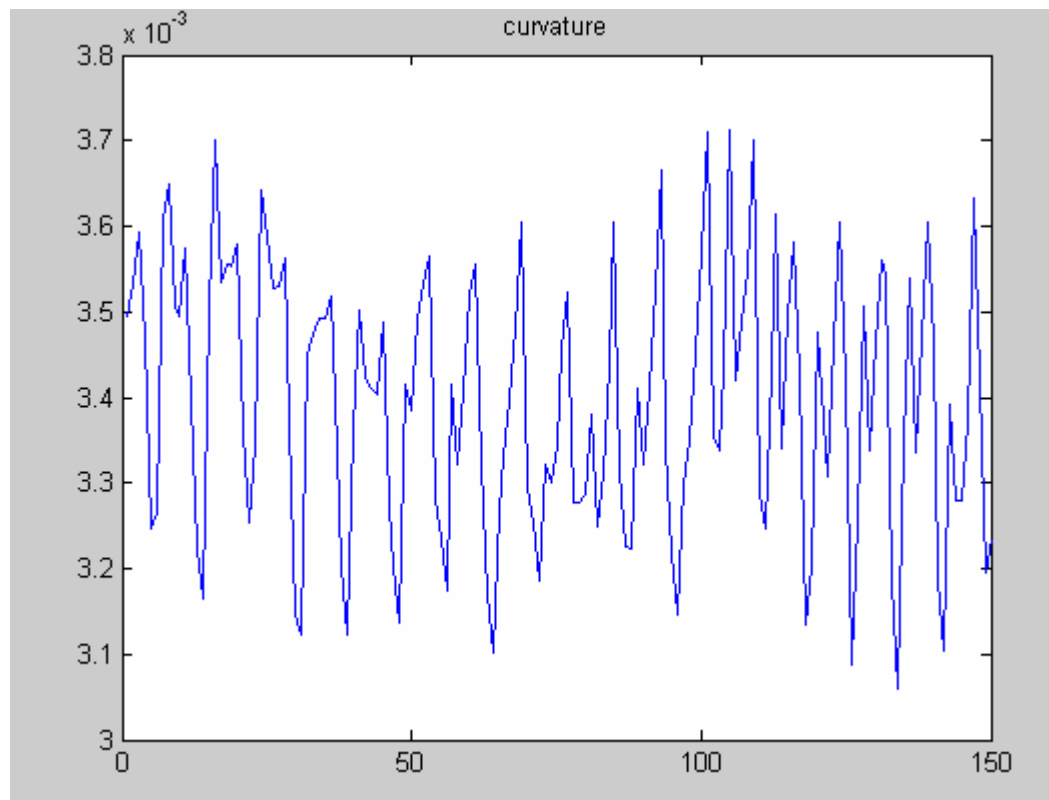
	26S	31HD	130T	PES	PAD	53S	PP21	63M
Arit. průměr povrchových výšek	10,919	16,862	7,987	7,316	6,668	16,751	18,318	16,486
Geom.průměr povrchových výšek	10,328	14,885	7,318	6,604	6,088	14,845	16,457	14,515
MAD	2,593	5,929	2,554	2,510	2,162	6,358	6,421	6,395
MS	0,072	0,111	0,049	0,075	0,068	0,183	0,131	0,234
PSC	0,008	0,017	0,003	0,008	0,007	0,042	0,026	0,070
Průměrná křivost	0,003	0,003	0,001	0,003	0,003	0,006	0,005	0,009
Rozptyl	10,391	47,042	8,872	9,339	6,795	53,107	60,113	56,374
Šikmost	0,110	-0,402	0,059	0,443	0,357	0,056	0,362	0,232
Špičatost	2,690	1,953	1,925	2,437	2,322	1,796	2,326	1,999
Fourier B1	0,053	-0,001	0,035	0,006	-0,006	0,058	-0,132	-0,006
Fourier freq. 1	0,005	0,015	0,020	0,026	0,026	0,030	0,006	0,039
Fourier B2	0,004	-0,010	0,082	0,003	-0,004	0,107	-0,021	-0,020
Fourier freq. 2	0,050	0,020	0,013	0,038	0,034	0,014	0,021	0,024
Fourier B3	0,008	-0,004	0,115	0,013	-0,005	0,083	-0,019	-0,024
Fourier freq. 3	0,038	0,024	0,010	0,014	0,033	0,022	0,029	0,030
Rz rough 10	14,707	24,653	11,358	12,702	10,710	26,506	31,589	28,200
Variační koeficient	29,366	40,581	37,063	41,701	38,965	43,410	42,213	45,464
Overall mean	10,919	16,862	7,987	7,316	6,668	16,751	18,318	16,486
Mean squared residual	7,107	46,536	7,918	9,239	6,647	13,480	59,270	42,839
Overall variance	10,388	47,030	8,870	9,336	6,794	53,093	60,097	56,359
Variance machine	3,281	0,494	0,952	0,097	0,147	39,623	0,827	13,524
Variance transversal	7,106	46,536	7,918	9,239	6,647	13,470	59,270	42,835
Variance longitudinal	10,388	47,030	8,870	9,336	6,794	53,093	60,097	56,359
Dispersion index	0,289	2,789	1,111	1,276	1,019	3,170	3,281	3,419
Overall dispersion index	0,289	0,028	0,115	1,276	0,021	2,276	0,043	0,789
Uniform below	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792	0,792
Clumped above	1,248	1,248	1,248	1,248	1,248	1,248	1,248	1,248
Fractal dimension- init.								
D rows	1,621	1,526	1,596	1,543	1,536	1,526	1,527	1,511
D cols	2,164	1,691	2,342	1,771	1,846	2,010	1,702	2,211
D diag	2,151	1,689	2,274	1,795	1,861	2,009	1,716	2,232
D omni	2,161	1,691	2,339	1,771	1,845	2,007	1,702	2,202
Fractal dimension- full data								
D rows	2,219	2,068	2,084	2,111	2,124	2,089	2,101	2,133
D cols	2,988	2,850	3,006	2,956	2,966	2,965	2,926	2,787
D diag	2,905	2,841	3,002	2,956	2,972	2,856	2,919	2,906
D omni	2,897	2,768	2,919	2,840	2,854	2,718	2,853	2,666

Příloha 4.

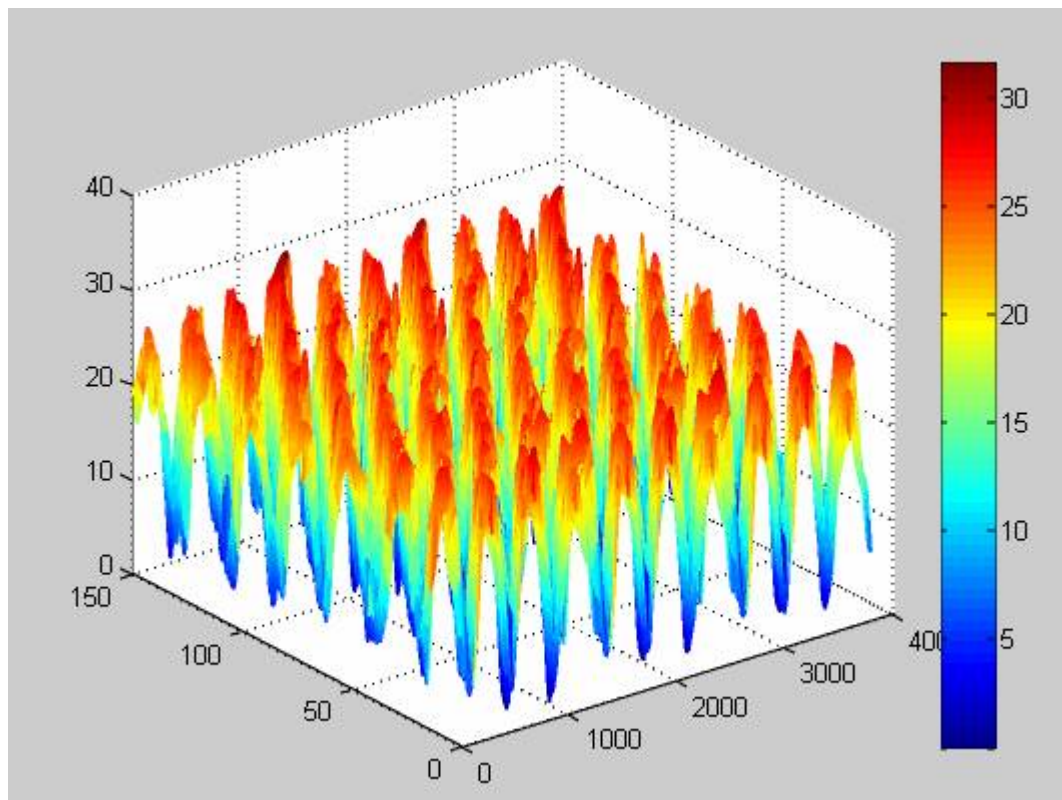
26S

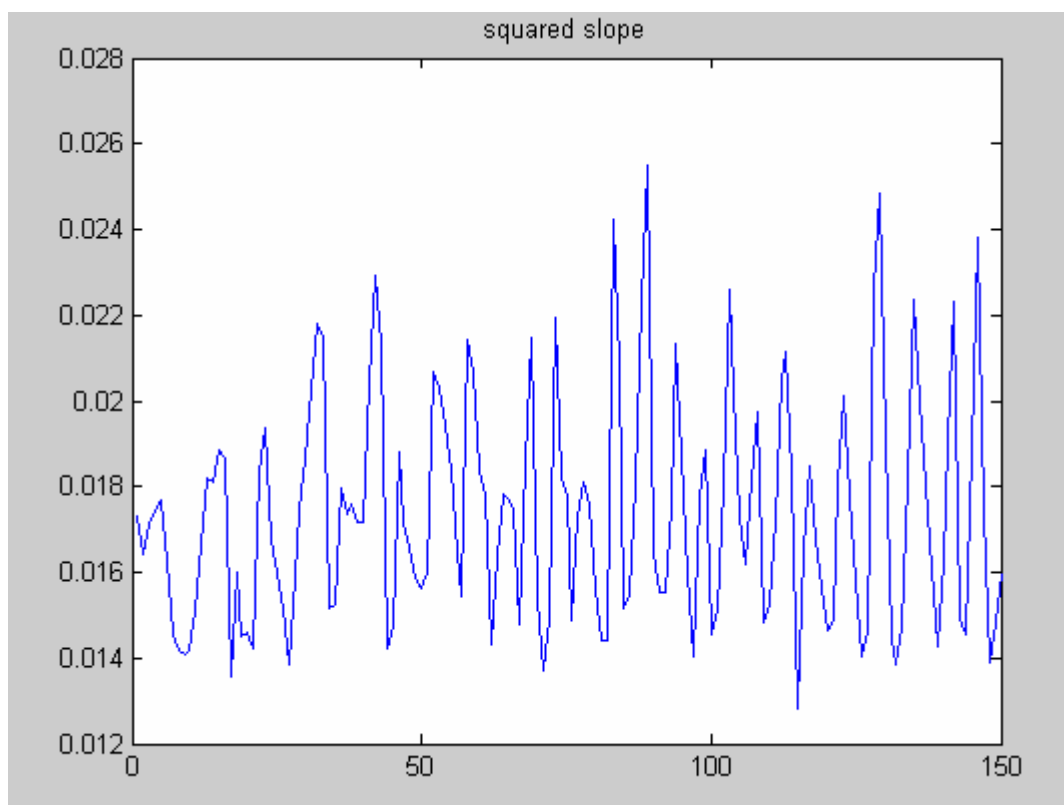
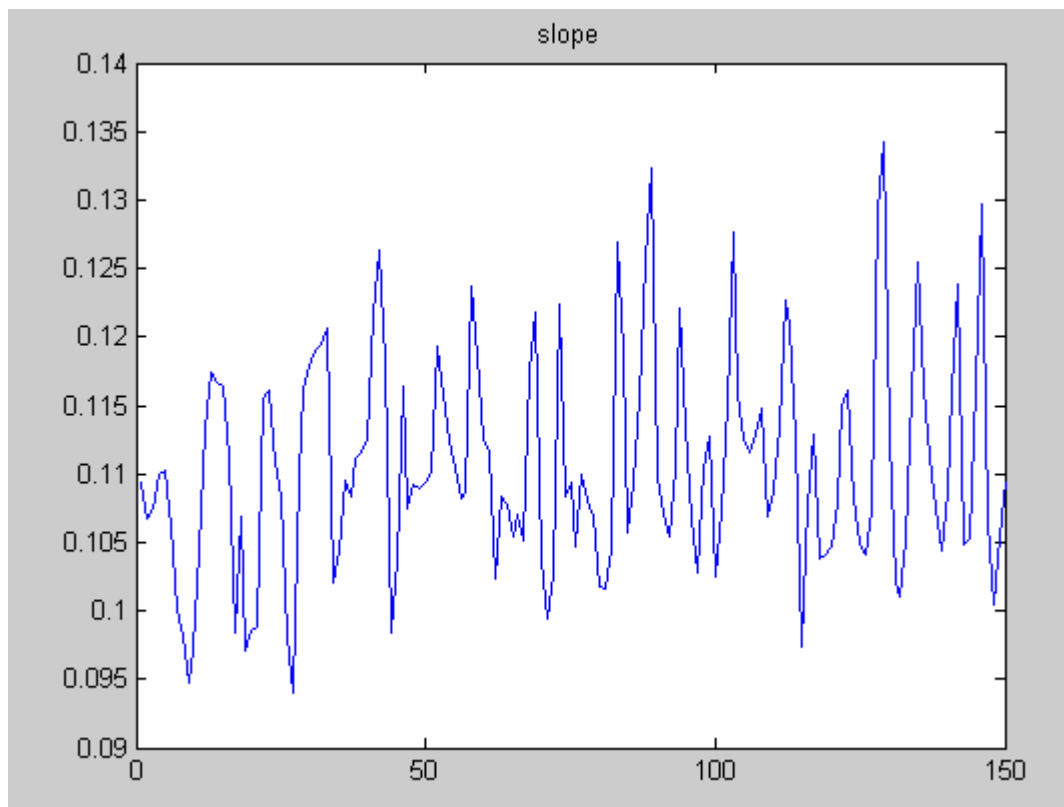


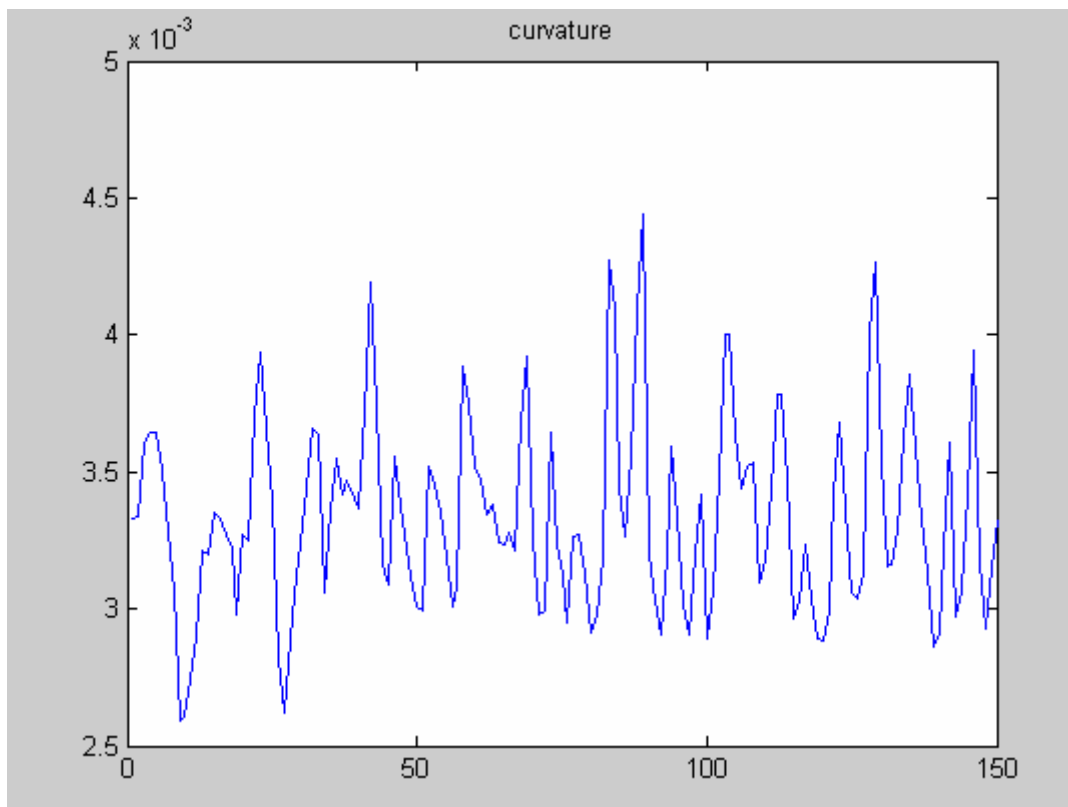




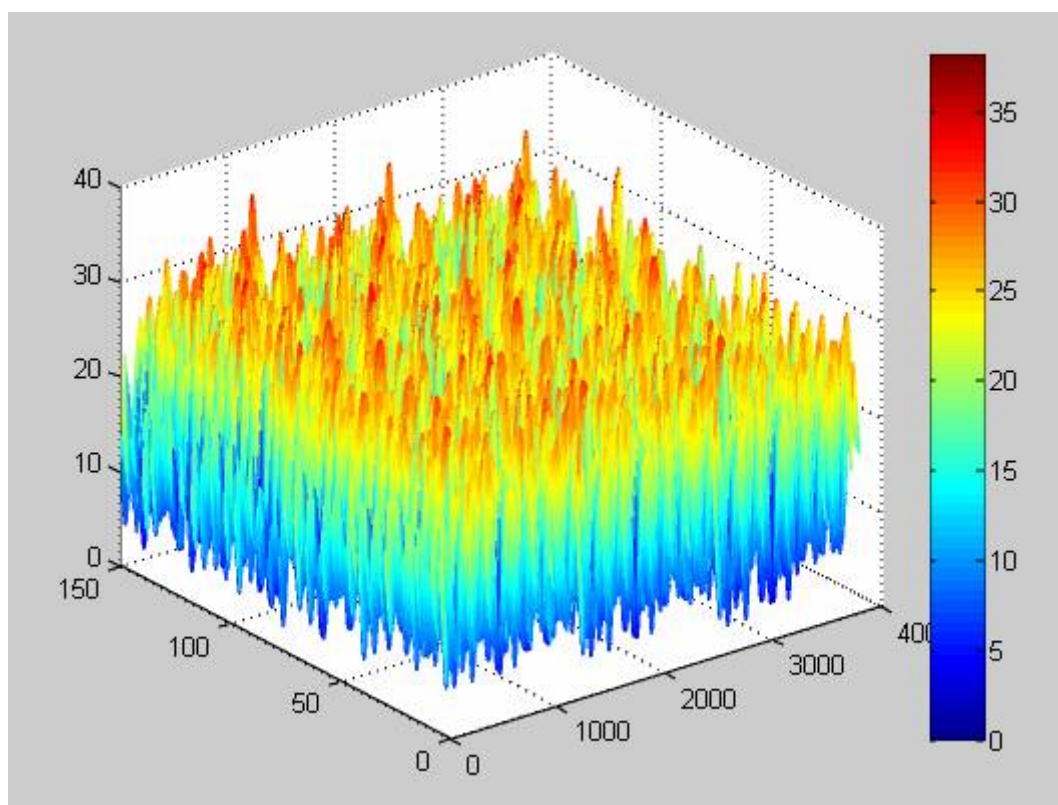
31HD

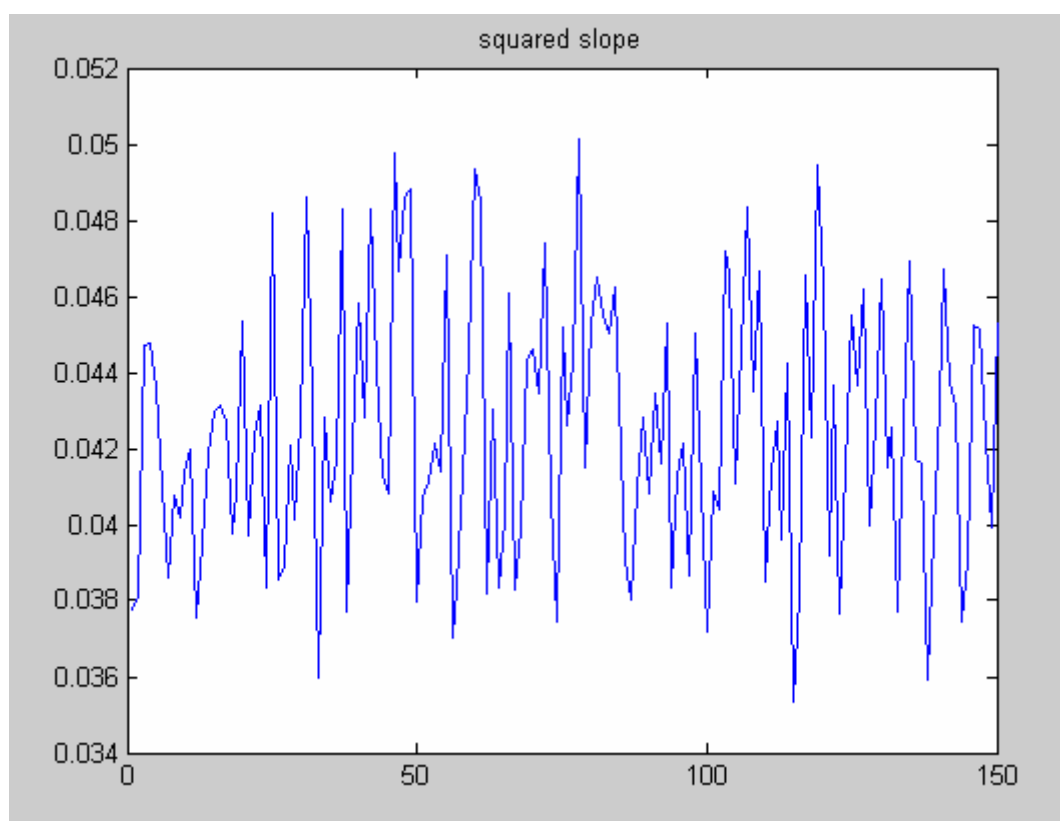
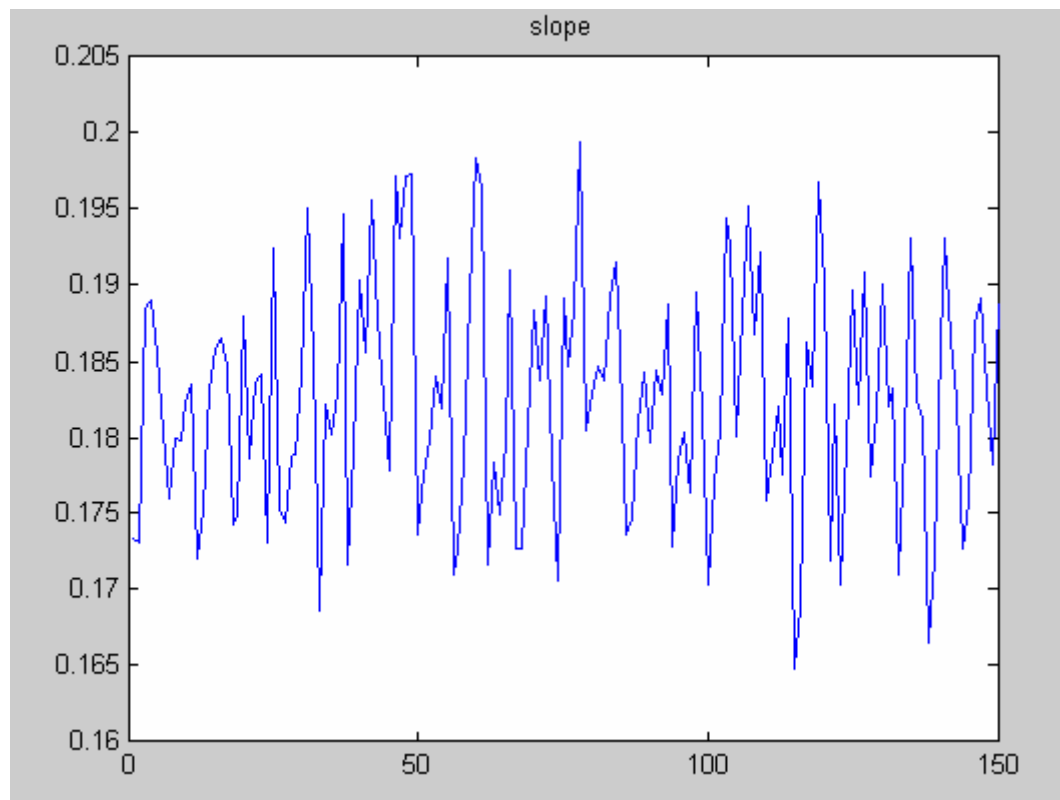


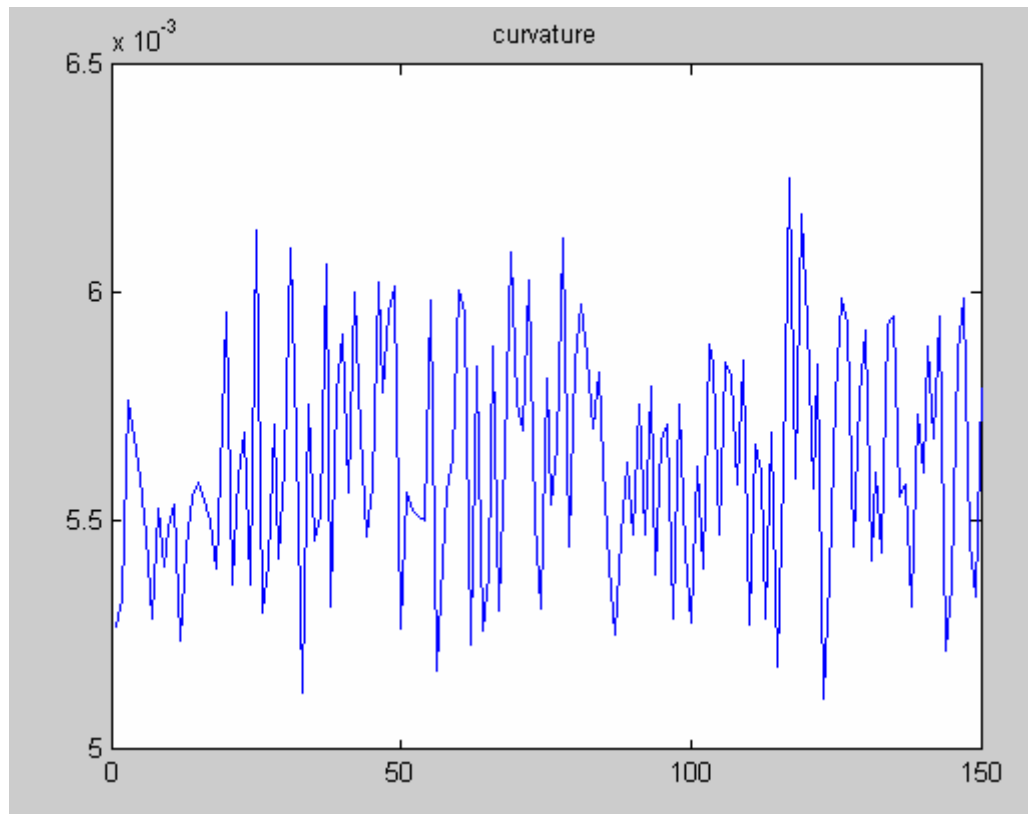




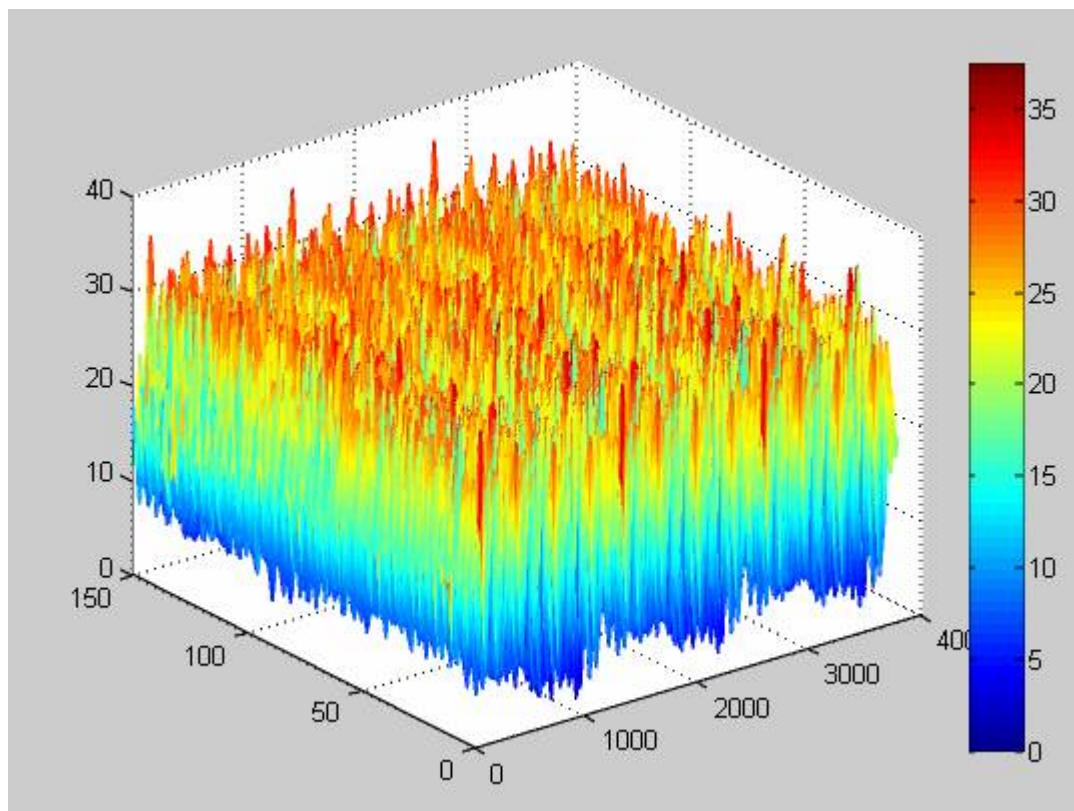
53S

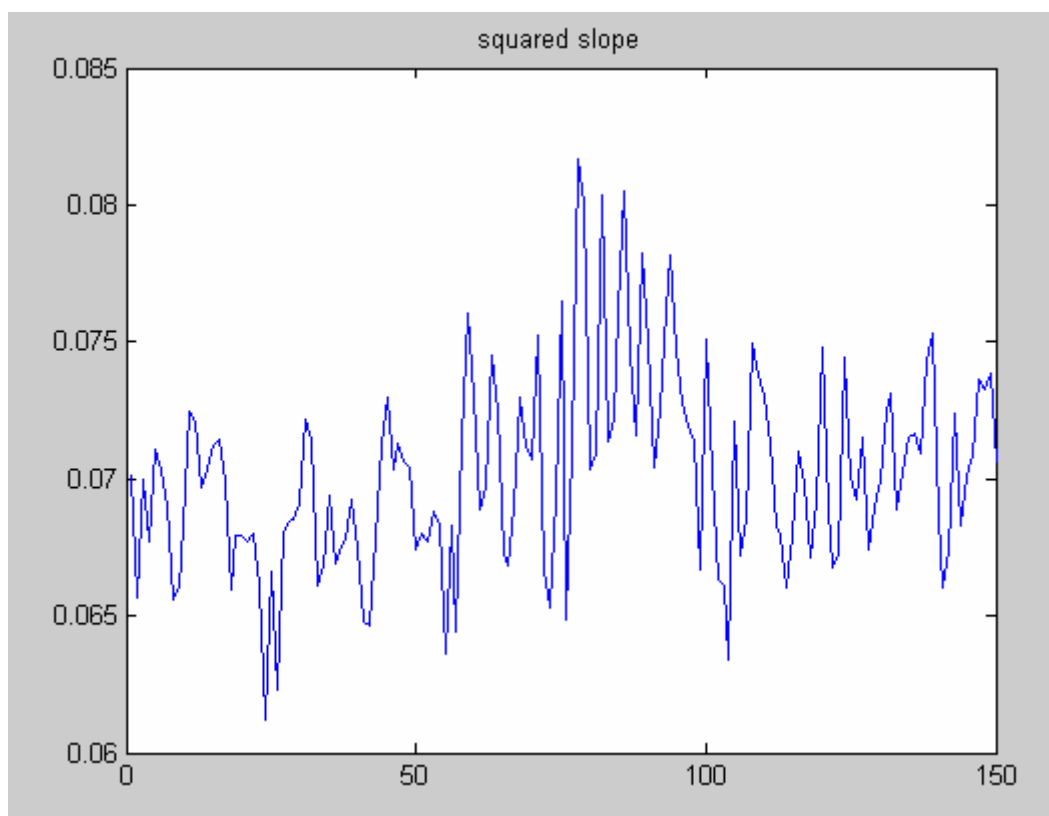
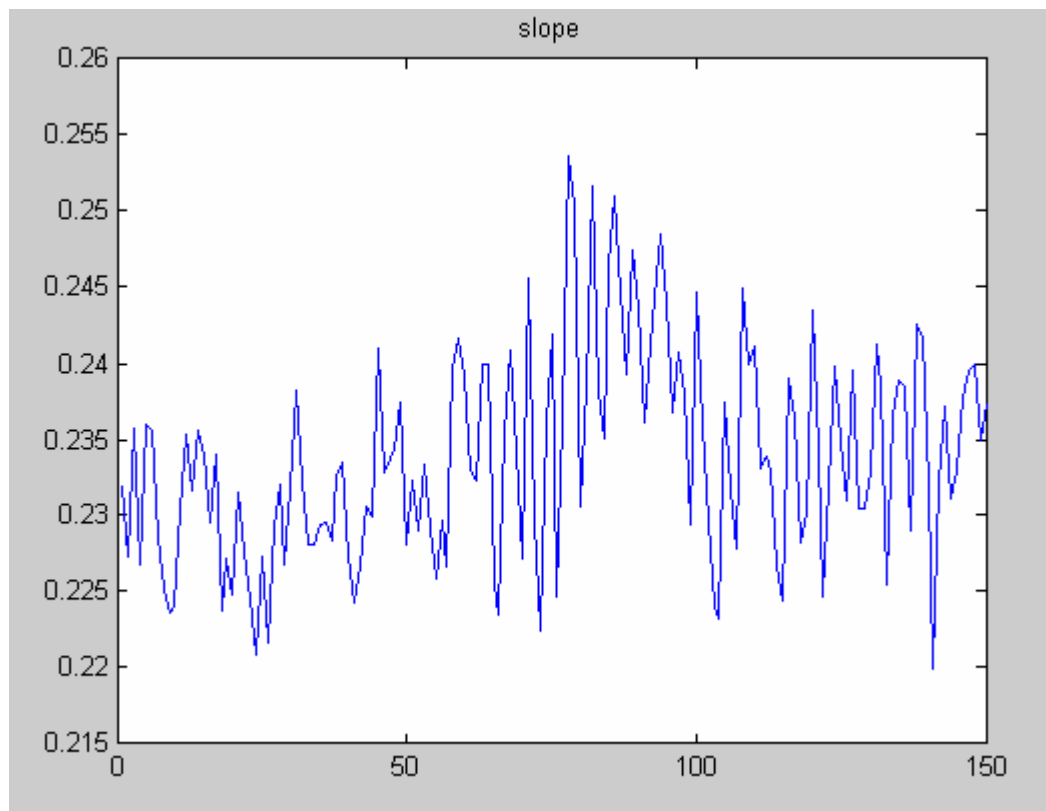


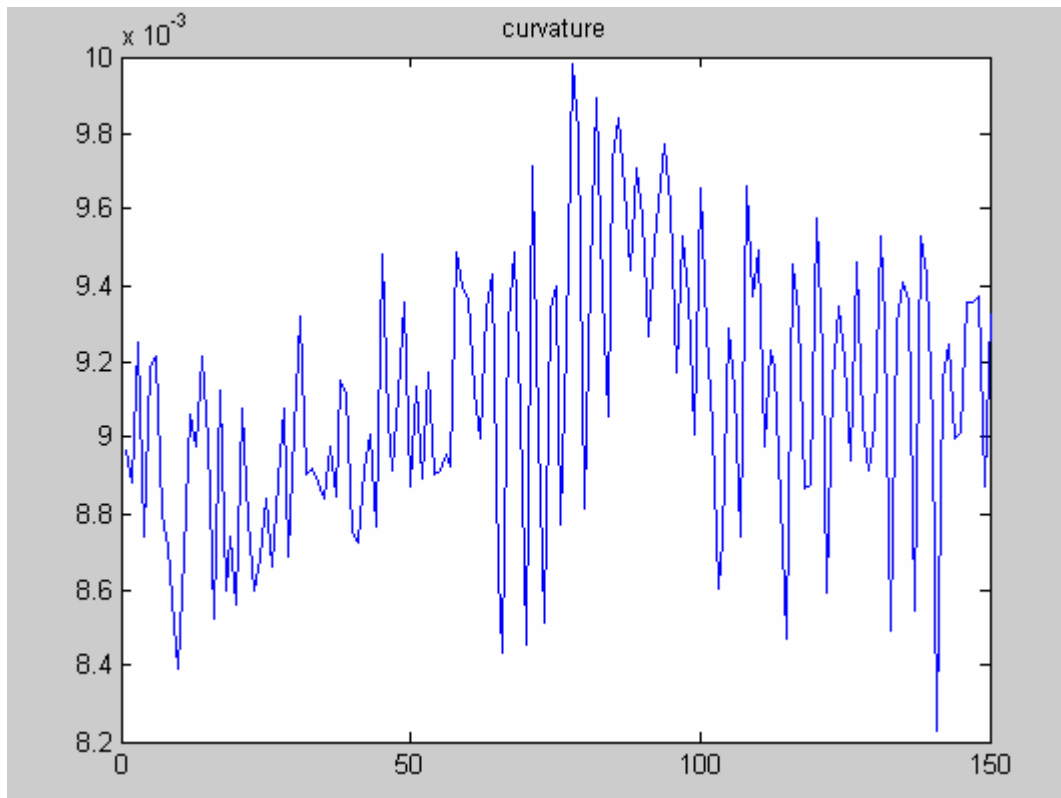




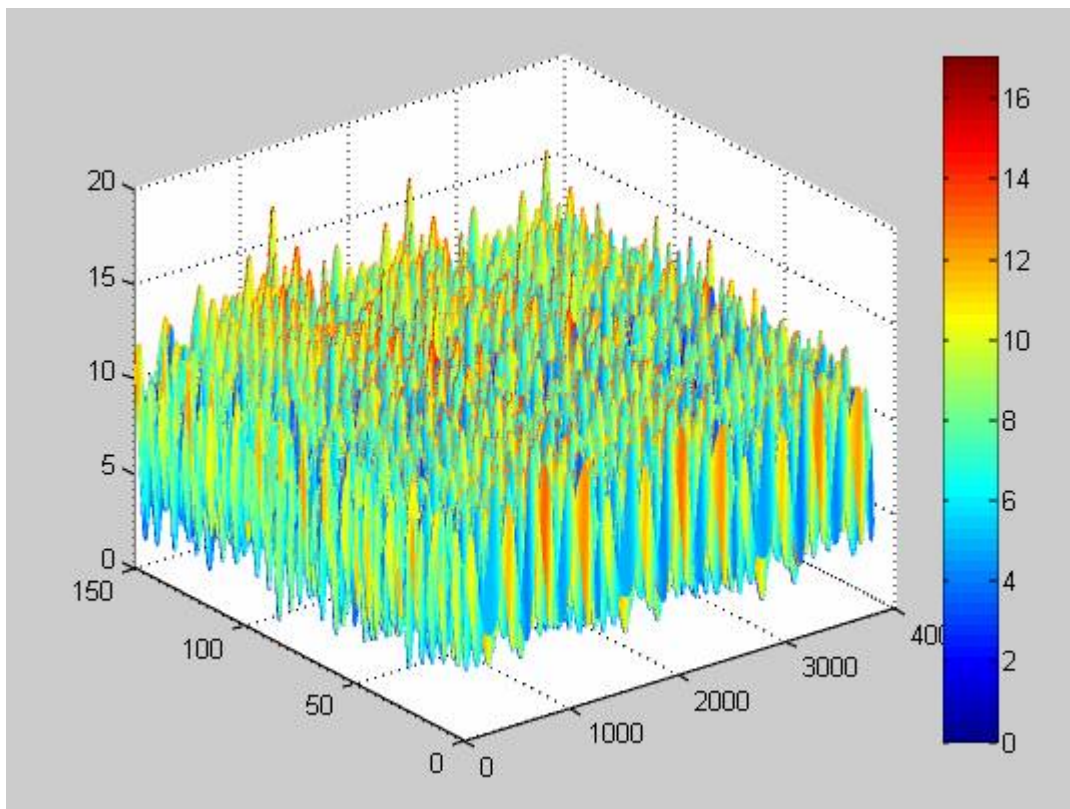
63M

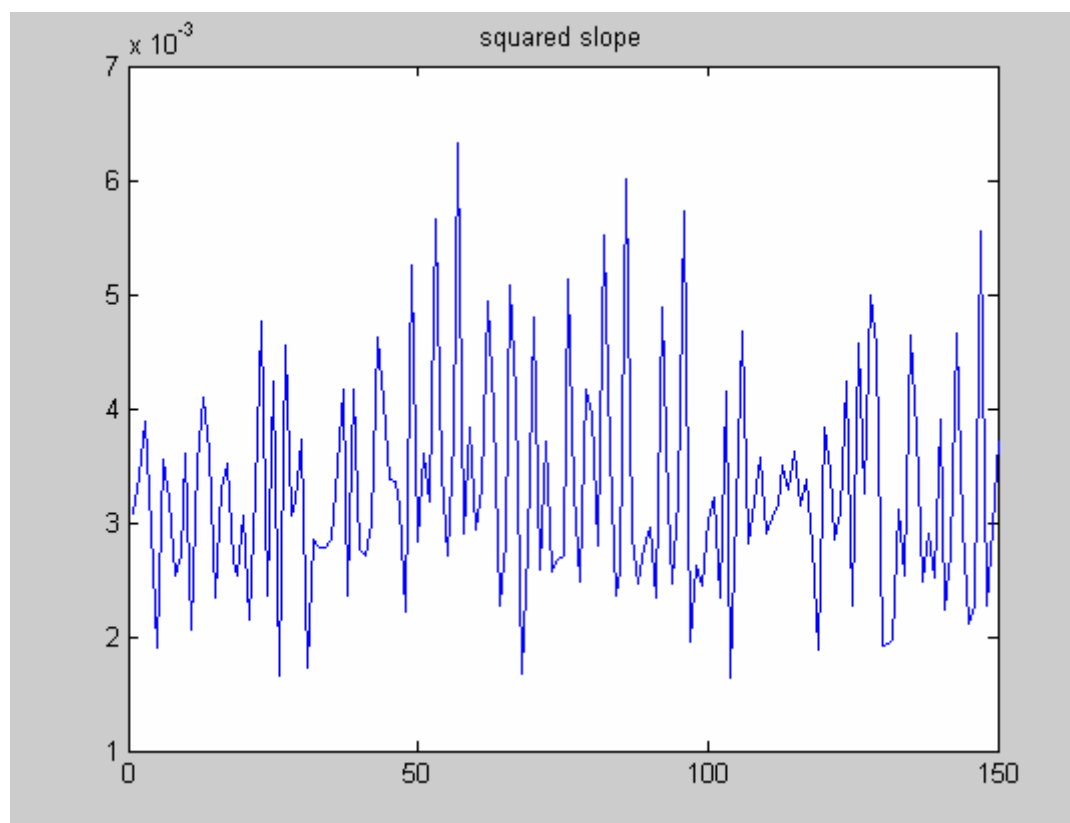
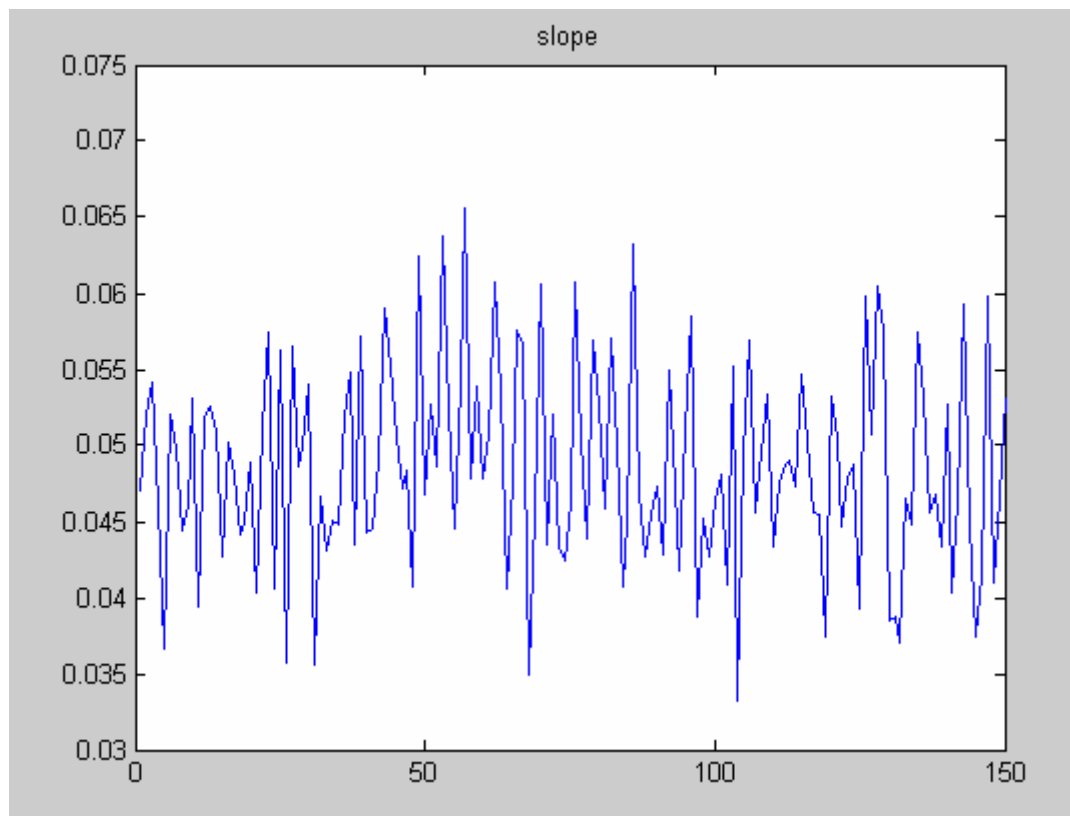


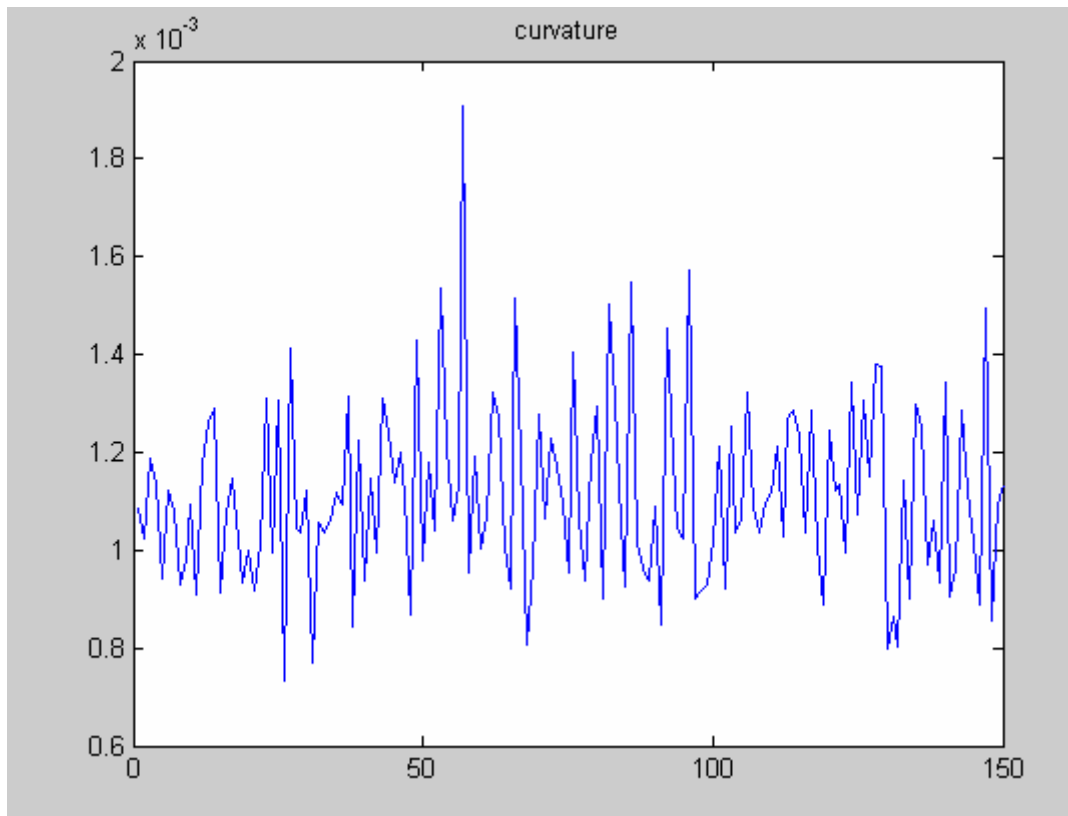




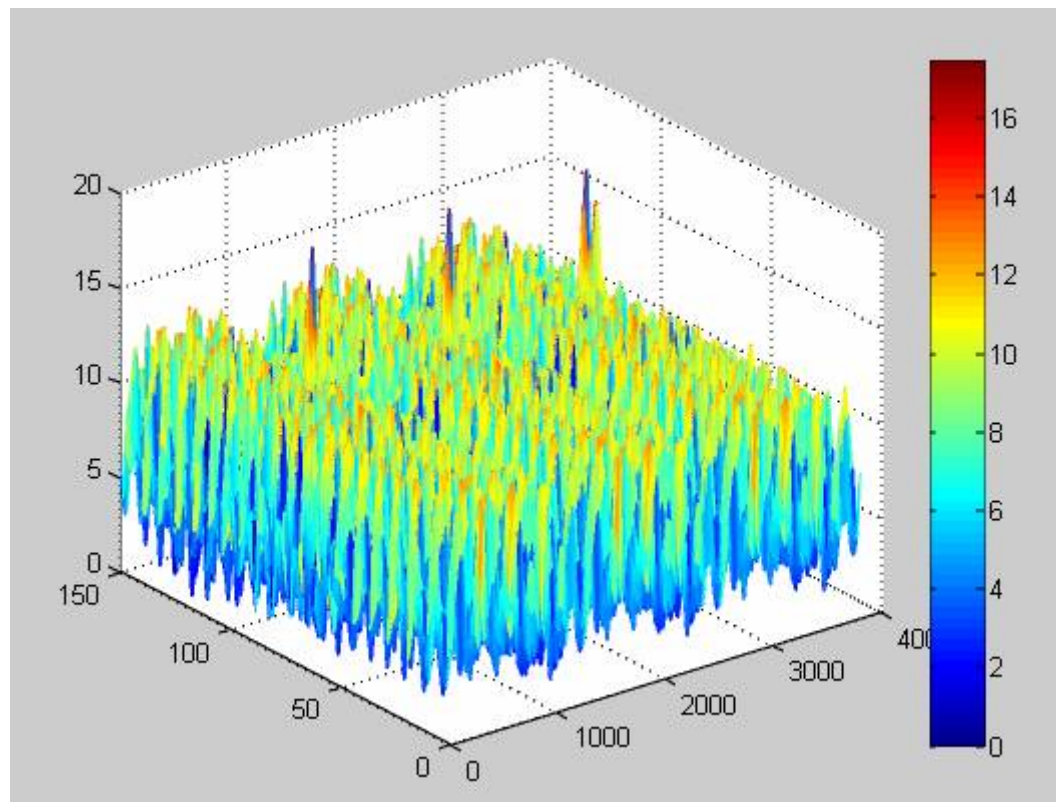
130T

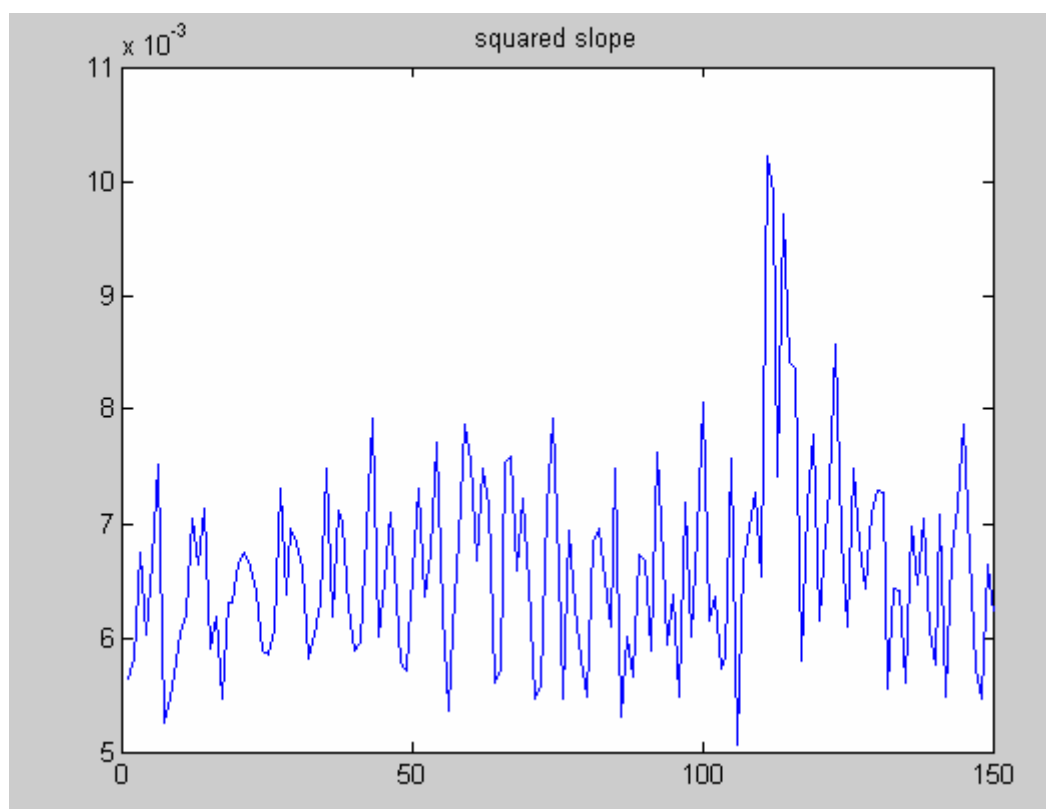
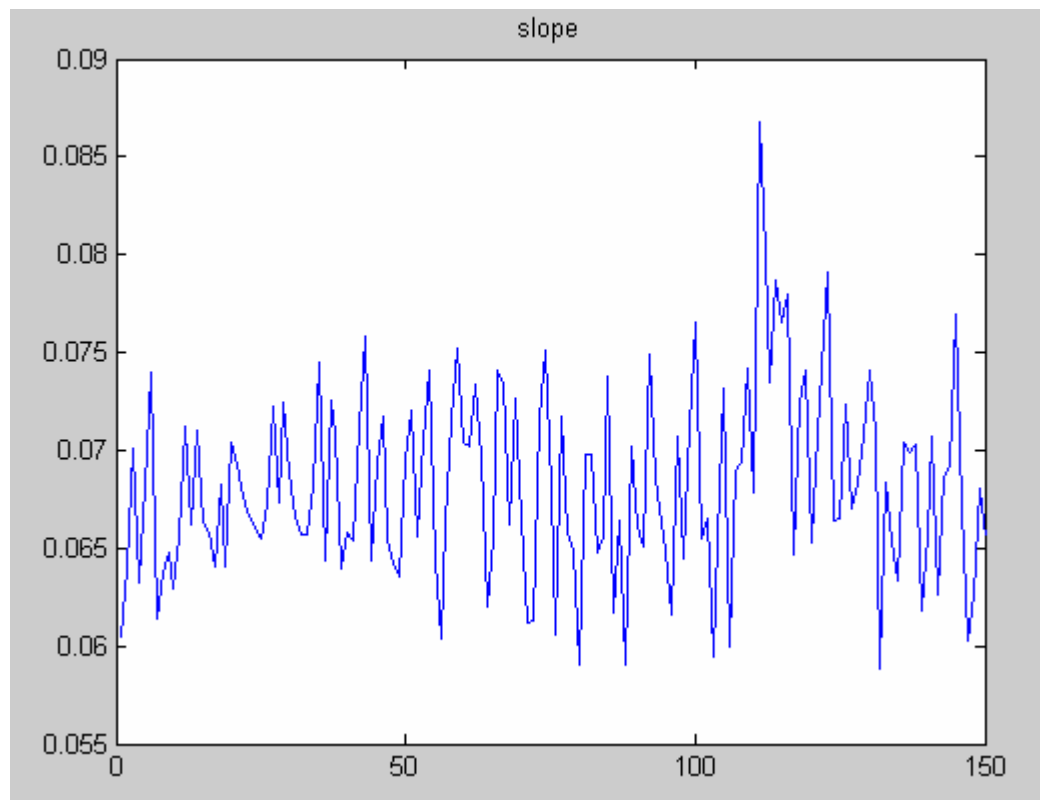


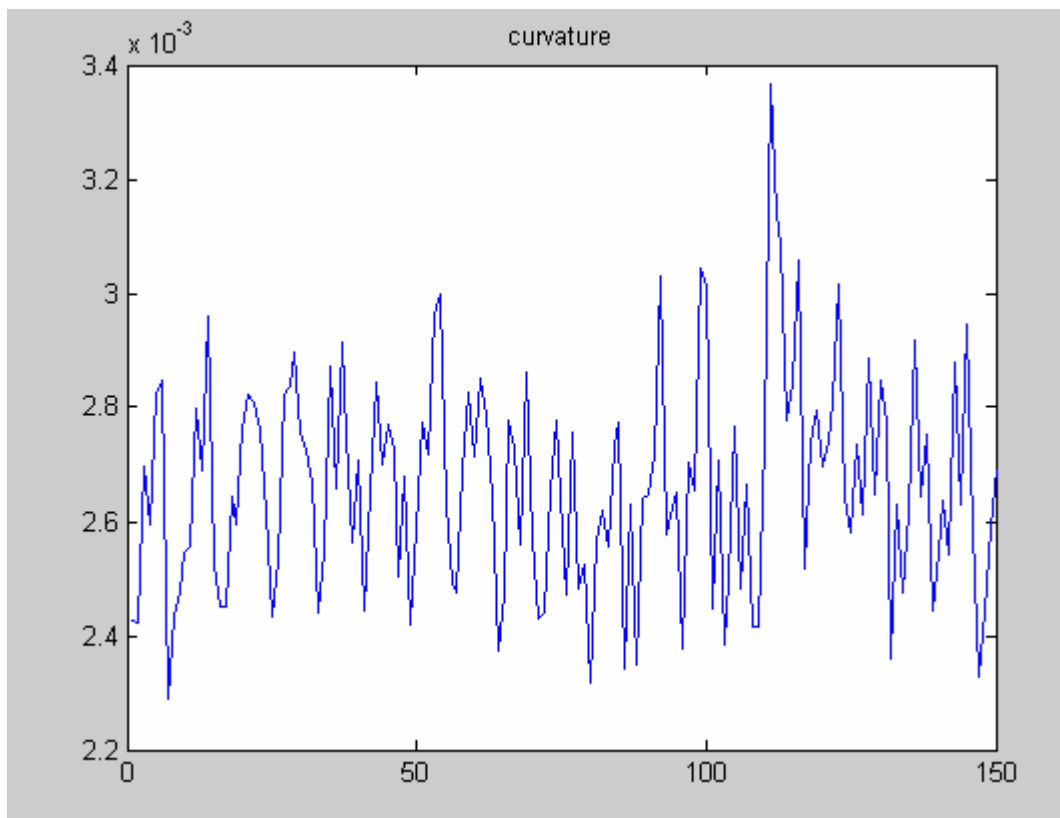




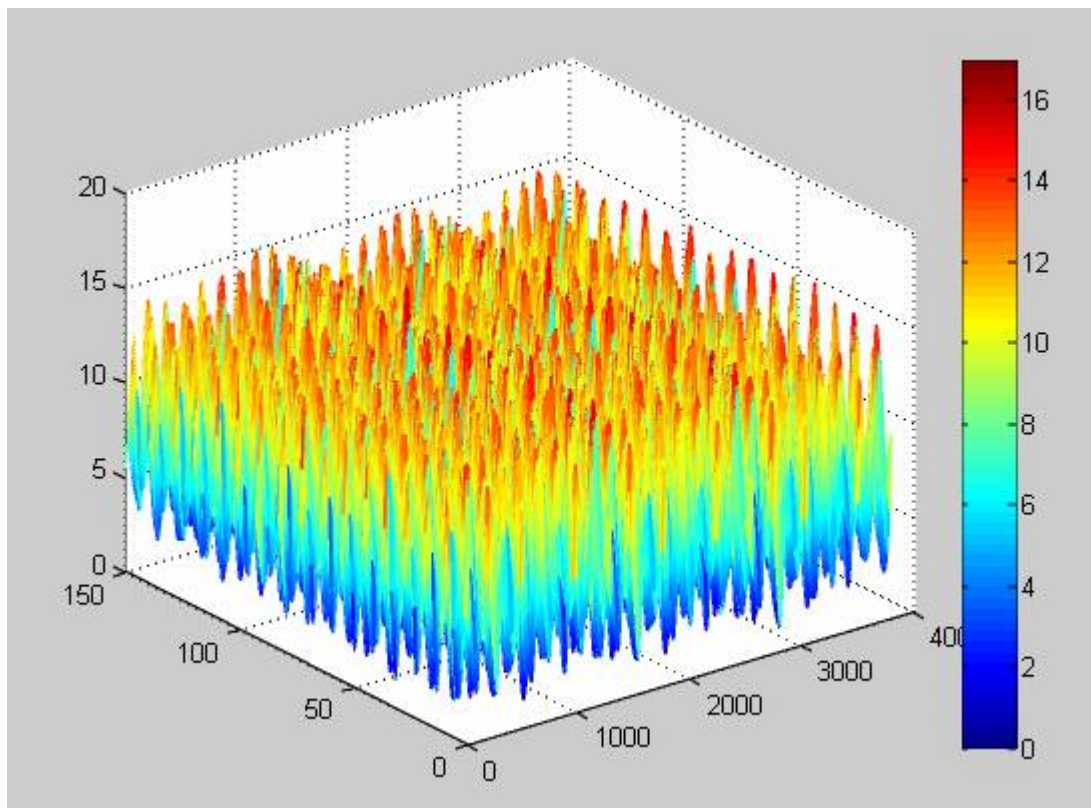
PAD

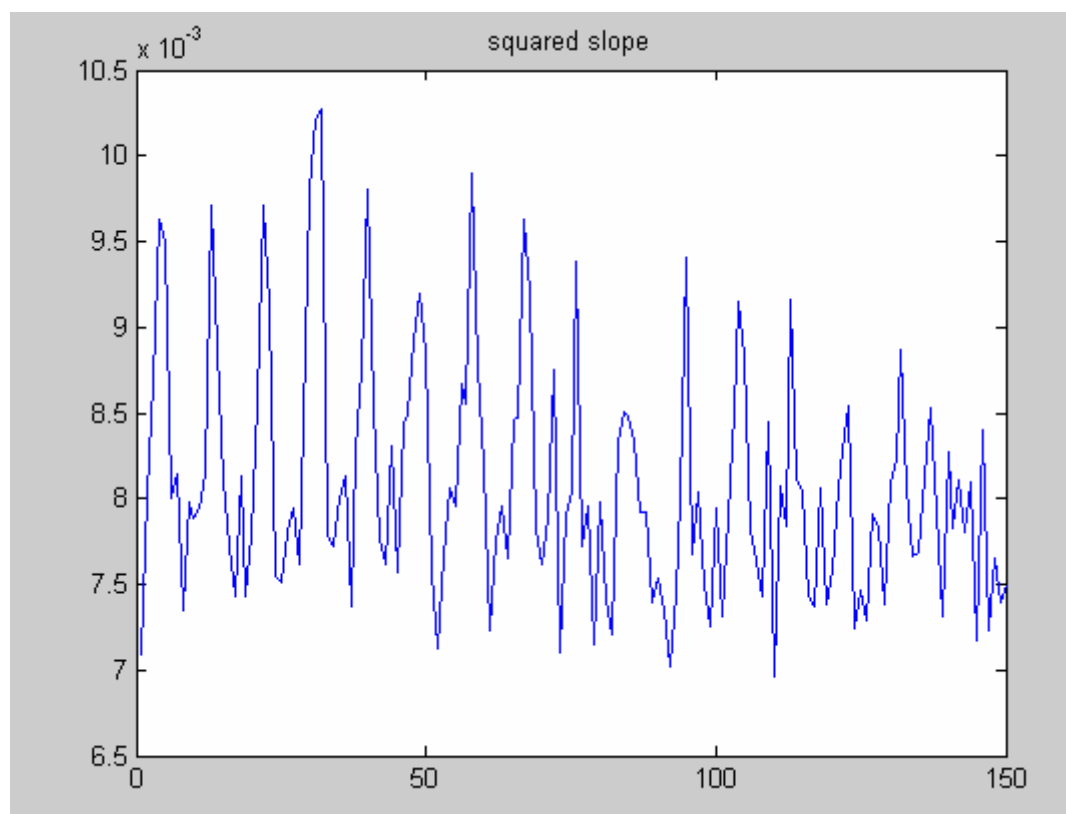
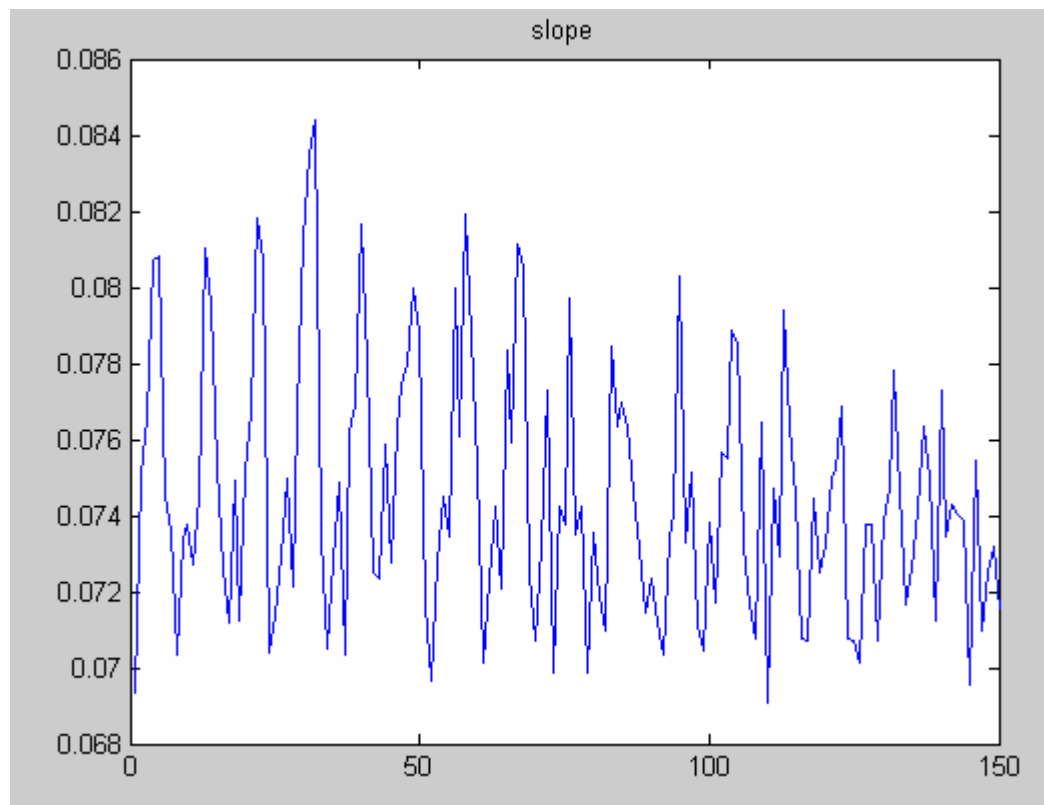


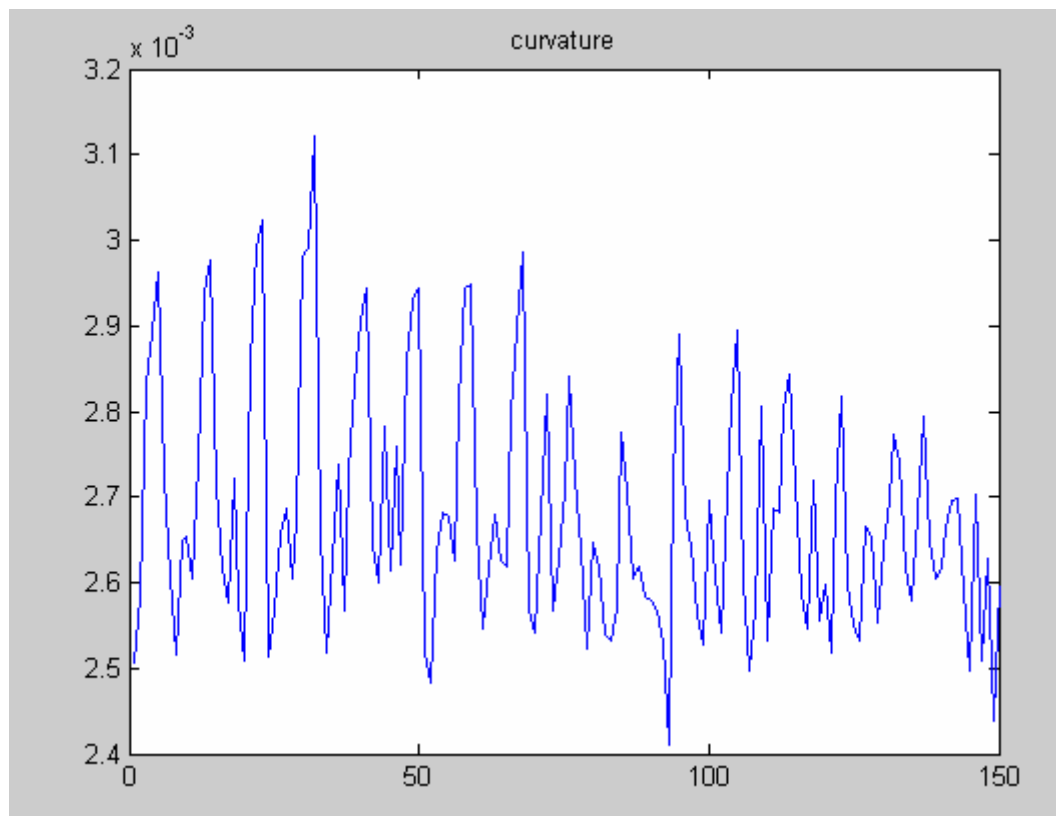




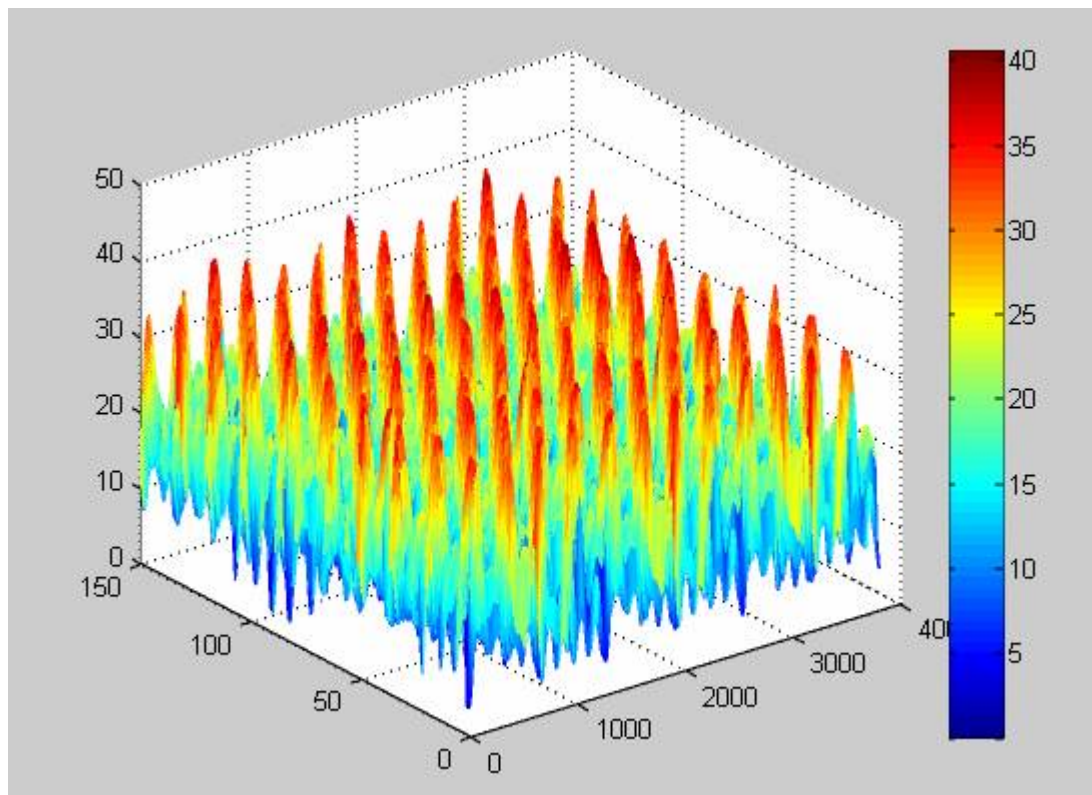
PES

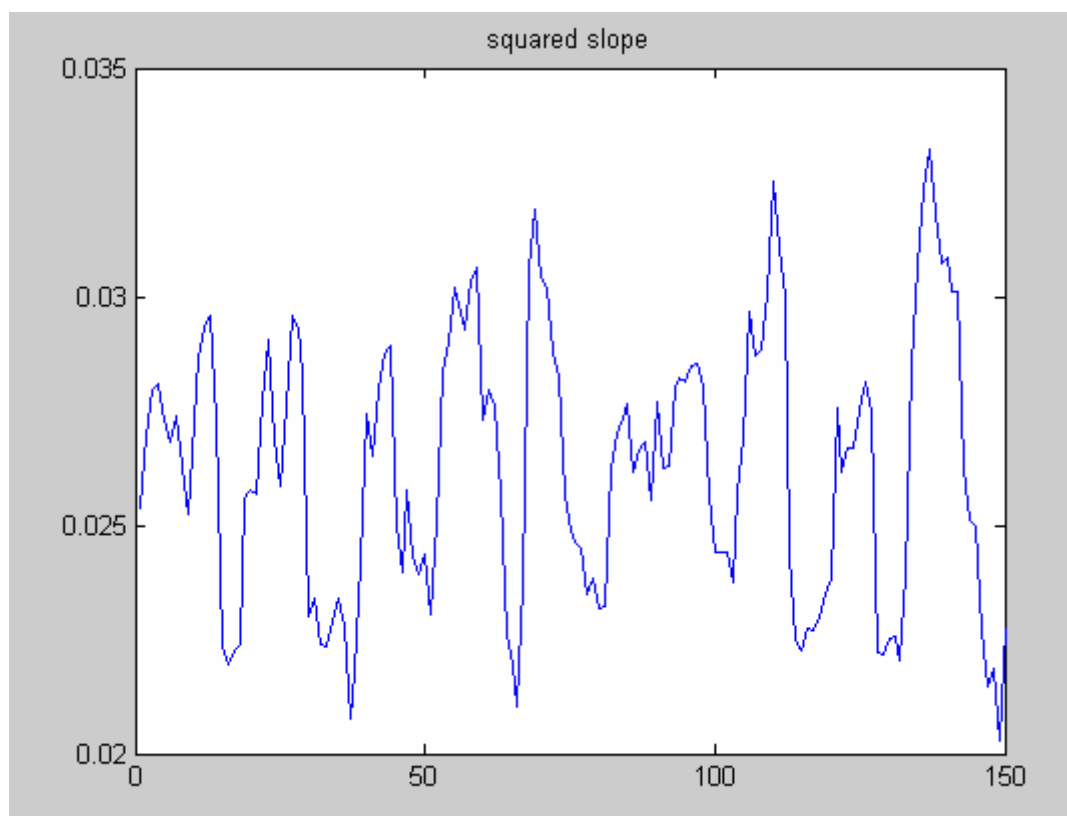
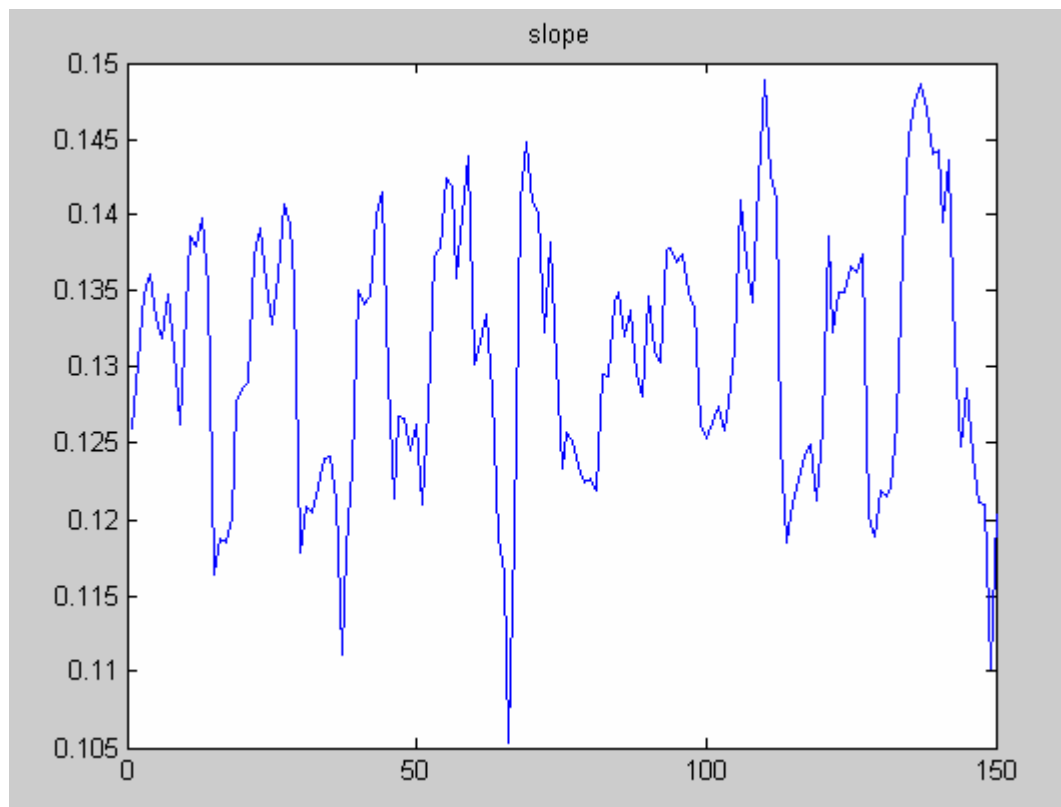


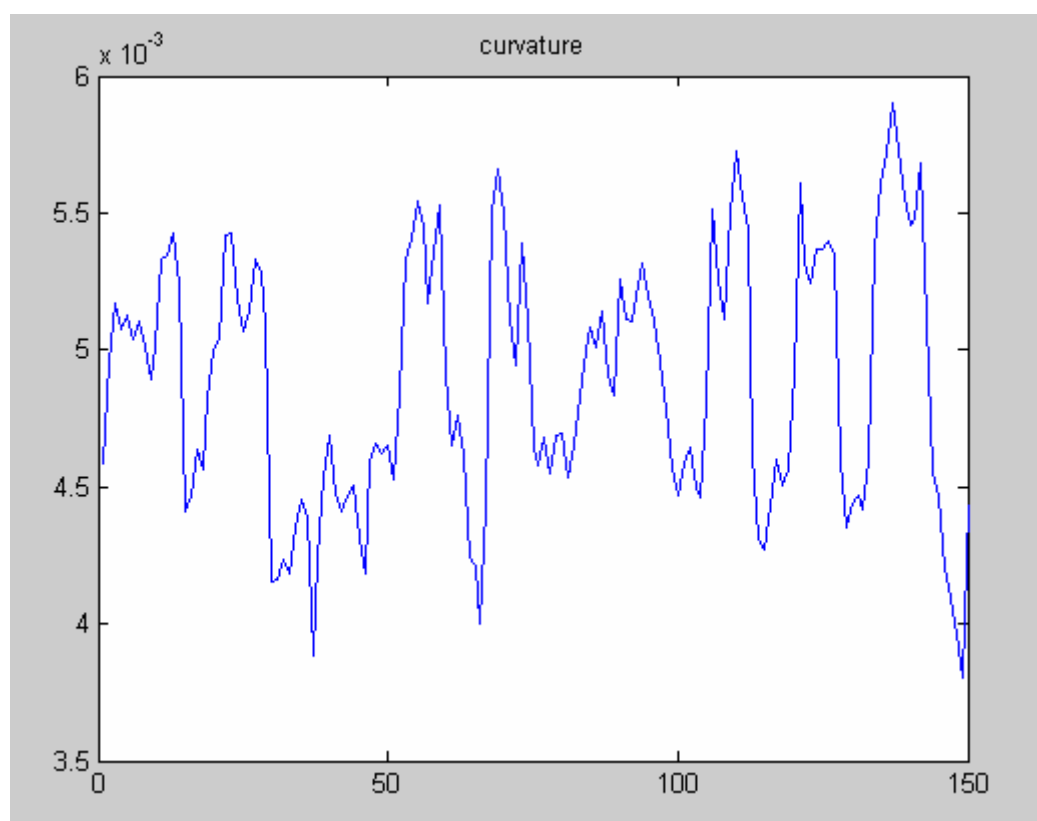




PP21







Příloha 5.